

# 비접촉 화학작용제 검출기의 MCT 광검출기를 위한 적분기 기반의 리드아웃 회로 구현

박재현<sup>1,+</sup>

## Realization of Readout Circuit Through Integrator to Average MCT Photodetector Signals of Noncontact Chemical Agent Detector

Jae-Hyoun Park<sup>1,+</sup>

### Abstract

A readout circuit for a mercury-cadmium-telluride (MCT)-amplified mid-wave infrared (IR) photodetector was realized and applied to noncontact chemical agent detectors based on a quantum cascade laser (QCL). The QCL emitted 250 times for each wavelength in 0.2- $\mu\text{m}$  steps from 8 to 12  $\mu\text{m}$  with a frequency of 100 kHz and duty ratio of 10%. Because of the nonconstant QCL emission power during on-duty, averaging the photodetector signals is essential. Averaging can be performed in digital back-end processing through a high-speed analog-to-digital converter (ADC) or in analog front-end processing through an integrator circuit. In addition, it should be considered that the 250 IR data points should be completely transferred to a PC during each wavelength tuning period of the QCL. To average and minimize the IR data, we designed a readout circuit using the analog front-end processing method. The proposed readout circuit consisted of a switched-capacitor integrator, voltage level shifter, relatively low-speed analog-to-digital converter, and micro-control unit. We confirmed that the MCT photodetector signal according to the QCL source can be accurately read and transferred to the PC without omissions.

**Keywords:** readout circuit, chemical agent detector, switched-capacitor integrator, MCT photodetector, QCL

### 1. 서 론

대부분의 화학작용제는 무색, 무취이므로 특정 영역에 집중적으로 분포되어 있어도 육안으로 확인하기가 쉽지 않다. 따라서 언제든지 대량살상무기 (WMD, weapon of mass destruction)나 테러용으로 은밀히 사용하는 것이 가능하다. 또한 유독성 공업용 화학물질 (TIC, toxic industrial chemical)은 유출된 지역의 작업자 뿐만 아니라 유출 시 인근 주민들에게도 심각한 피해를 줄 수 있다. 이러한 화학작용제 및 TIC의 유출로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 화학 약품의 노출 및 오염을 신속하게 감지하는 것이 중요하다 [1-4].

화학작용제 검출기 (chemical agent detector)는 접촉식 및 비접촉식으로 분류된다. 접촉식 검출기의 경우 위험한 화학물질에

노출될 위험성이 높고 감지 범위와 면적이 제한적이다. 비접촉 검출 기술은 주로 적외선 분광법 (spectroscopy), 레이저 기반 분광법 및 라만 (Raman) 분광법을 포함한 광학 기반 기술이 적용된다. 그 중 원거리에서도 높은 검출 성능을 구현하는 적외선 분광기 기반 검출 기술은 높은 정확도와 소형화의 장점이 있으며, 장파장 (long-wavelength) 적외선 영역에서도 화학물질을 식별할 수 있는 특성을 기반으로 한 화학물질 검출 기술로 주목받고 있다 [2,3].

소형 적외선 분광기를 이용한 비접촉 화학작용제 검출기는 드라이버를 포함하는 8~12  $\mu\text{m}$ 의 파장에서 동작하는 양자 캐스케이드 레이저 (QCL, quantum cascade laser), 리드아웃 회로가 있는 적외선 광검출기 (photodetector), 광학 장치 및 데이터 처리 장치로 구성된다. Fig. 1은 이러한 소형 적외선 분광기의 개략도를 나타낸 것이다 [3,4]. 이러한 검출기는 검출 표면 및 그 근처에서 다양한 화학 물질 및 TIC를 검출할 수 있다.

본 논문에서는 열전 냉각기 (thermoelectric cooler)를 포함하는 증폭기 내장형 HgCdTe (MCT, mercury cadmium telluride) 중 파장 (mid-wavelength) 적외선 광검출기를 위한 스위치드-커패시터 적분기 (switched-capacitor integrator) 기반의 리드아웃 (readout) 회로를 구현하고 그 특성을 평가하였다.

<sup>1</sup> 한국전자기술연구원 나노융합연구센터 (Nano Convergence Technology Research Center, Korea Electronics Technology Institute)  
25 Saenari-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13509, Korea  
<sup>+</sup> Corresponding author: jhpark@keti.re.kr  
(Received: Mar. 15, 2021, Accepted: Mar. 21, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

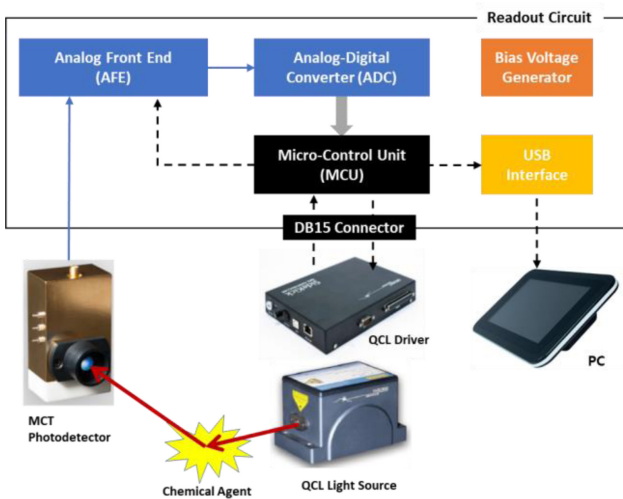


Fig. 1. Block diagram of IR spectroscopy-based non-contact chemical agent detector

## 2. 연구 방법

비접촉 화학작용제 검출기를 위한 리드아웃 회로는 QCL 드라이버에 동기화되어 동작하도록 설계되어야 한다. Fig. 2는 QCL 드라이버의 트리거 신호 타이밍 다이어그램을 나타낸 것이다. QCL은 8um에서 12 um까지 0.2 um 간격으로 각 파장에 대해 250 번을 트리거 신호의 레벨이 1인 동안 방출한다. 이 때 트리거 신호의 주파수는 100 kHz이고 듀티비 (duty ratio)는 10%이다.

소자의 불안정성으로 인해 QCL의 방출 전력이 일정하지 않기 때문에 온-듀티 (on-duty) 동안 광검출기 신호의 평균값을 계산할 필요가 있다. 이런 평균값 계산은 10MSPS 이상의 샘플링 (sampling) 주파수를 갖는 고속 아날로그-디지털 변환기 (ADC,

analog-to-digital converter)를 사용하여 디지털 영역에서 후처리 (back-end processing) 하는 방법과 아날로그 적분기 회로를 사용하여 아날로그 영역에서 전처리 (front-end processing) 하는 방법이 있다. 여기서 중요하게 고려되어야 할 점은 적외선 광검출기 데이터는 15~18 ms의 QCL 파장 조정(tuning) 기간 동안 리드아웃 회로에서 USB 단자를 통해 PC로 완전히 전송되어야 한다는 것이다. 먼저, 고속 ADC를 사용해서 하나의 트리거 펄스 동안 임의로 변하는 MCT 광검출기 신호를 10회 이상 샘플링 하여 모두 디지털 데이터로 변환하고 이렇게 변환된 데이터 전체를 파장 조정 기간 동안 PC로 전송하는 방법이 있다. 이 경우 데이터 양이 너무 많아 전송 속도에 문제가 생길 수 있다. 이를 해결하기 위해 QCL의 온-듀티 동안 MCT 광검출기의 아날로그 출력 신호를 적분하고 상대적으로 저속의 ADC를 이용하여 트리거 신호의 하강 에지 직전에 적분된 신호를 샘플링 하여 오프-듀티 동안 디지털 데이터로 변환하고 이를 메모리에 기록하는 형태로 설계할 수 있다. 이러한 과정을 250회 반복한 후 모든 저장된 데이터를 QCL 파장 조정 기간 동안 USB 단자를 통해 PC로 전송한다. 또한 적절한 데이터 압축을 통해 PC 인터페이스에 적합한 전송 속도, 예를 들어 초당 115,200비트를 구현할 수 있다.

설계된 리드아웃 회로는 스위치드-커패시터 기반의 적분기, 완전 차동 (fully differential) ADC 드라이버 기능의 전압 레벨 쉬프터 (voltage level shifter), ADC,

USB 변환기, 마이크로 제어 장치 (MCU, micro control unit), 양 및 음 바이어스 전압 발생기 (positive and negative bias voltage generator)와 기타 주변 회로로 구성되며, Fig. 3은 그 개념도를 나타낸 것이다 [5,6]. 좀더 상세히 설명하면, 스위치드-커패시터 적분기와 전압 레벨 쉬프터를 사용하여 설계된 아날로그 전처리 (AFE, analog-front-end) 회로도 Fig. 4와 같다. 적분기의

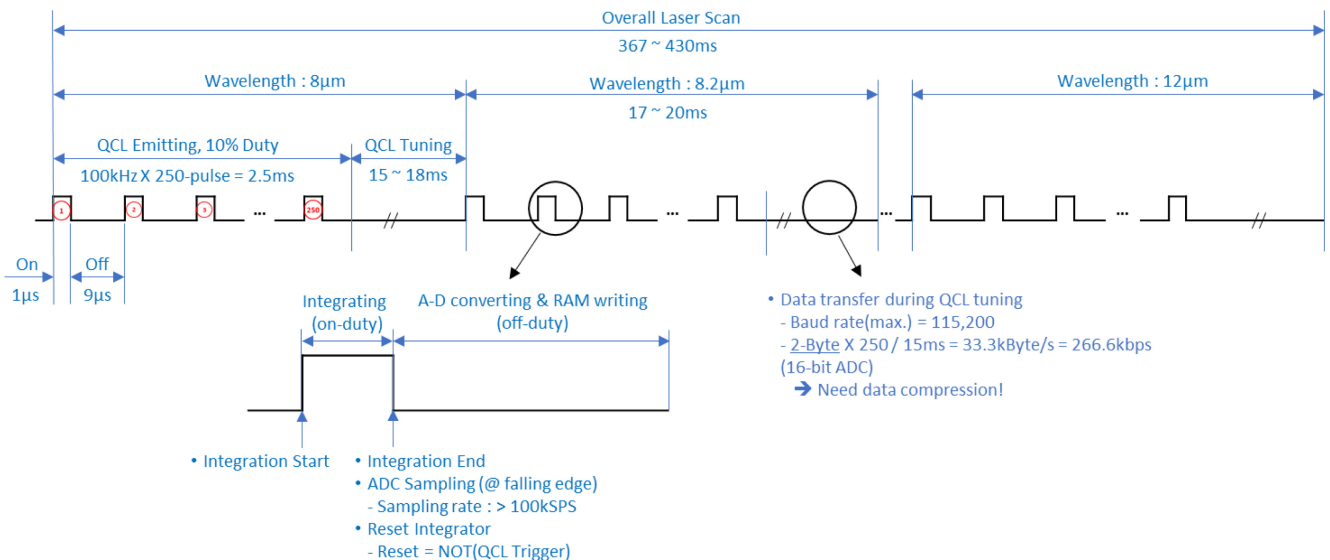


Fig. 2. Timing diagram of QCL trigger signal

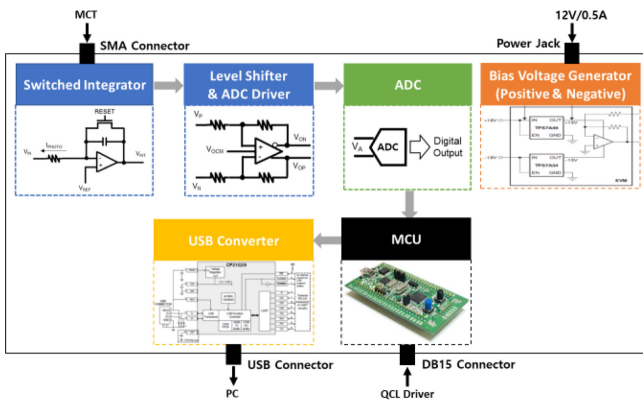


Fig. 3. Concept diagram of readout circuit

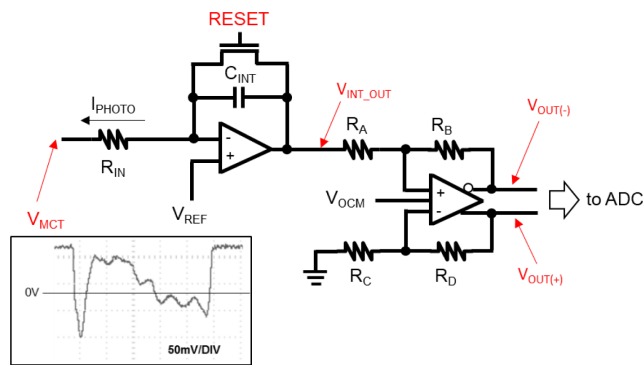


Fig. 4. Circuit of analog-front-end (AFE) based on switched-capacitor integrator

초기화 신호 RESET는 QCL이 동작하는 동안에만 적분을 수행하기 위해 QCL 트리거 신호를 논리 부정 게이트 (NOT gate)를 통해 연결한다. MCT 광검출기 신호 V<sub>MCT</sub>는 Fig. 4의 실선상자와 같이 양의 오프셋 전압과 음으로 증가하는 신호 전압을 갖는다. 따라서 적분기 출력 전압 V<sub>INT\_OUT</sub>는 양의 값과 음의 값을 모두 가질 수 있으며 이 출력 전압은 전압 레벨 쉬프터에 의해 차동 출력 (differential-ended)으로 변환되고 출력 공통 모드 (output common mode) 전압 V<sub>OCM</sub>을 통해 ADC의 입력 범위로 적절하게 이동된다.

이렇게 설계된 리드아웃 회로는 인쇄 회로 기판(PCB)을 통해 구현되었으며, Fig. 5는 구현된 리드아웃 회로의 사진을 나타낸 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

구현된 리드아웃 회로를 평가하기 위해 약 100 mV의 오프셋 전압과 약 -2 V의 피크 신호 전압을 갖는 MCT 광검출기 신호와 100 kHz 주파수와 10% 듀티비를 갖는 트리거 신호를 인가하고 오실로스코프를 이용하여 주요 지점의 출력 전압 파형을

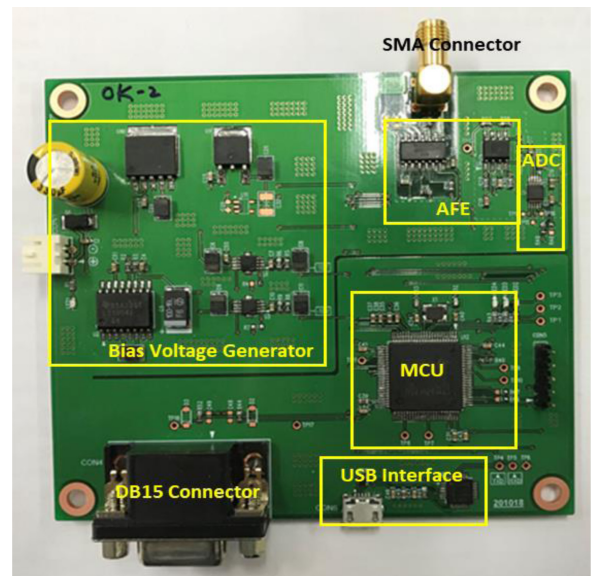


Fig. 5. Photograph of realized readout circuit

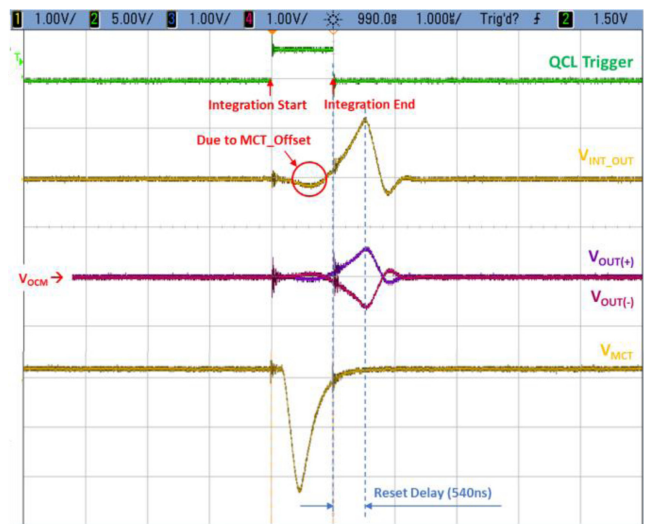


Fig. 6. Output waveforms of integrator and level shifter with trigger and MCT signal

측정하였다.

Fig. 6에는 측정된 적분기 출력 전압 V<sub>INT\_OUT</sub>과 전압 레벨 쉬프터의 차동 출력 전압 V<sub>OUT(+)</sub> 및 V<sub>OUT(-)</sub> 파형을 인가된 트리거 신호 QCL Trigger 및 MCT 광검출기 신호 V<sub>MCT</sub>와 함께 나타내었다. 예상한 것처럼 MCT 광검출기의 양의 오프셋 전압으로 인해 적분기는 초기에 음의 값을 출력함을 알 수 있으며, 전압 레벨 쉬프터 회로의 출력 공통모드 전압 V<sub>OCM</sub>을 조정하여 차동 출력 전압을 ADC 입력 범위로 이동시킬 수 있음을 확인하였다.

한가지 예상치 못한 특이한 현상은 트리거 신호의 하강 에지와 실제 적분기가 초기화 되는 지점 사이에 상당한 시간 지연이 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 초기화 지연 (reset delay)은 적분기 소자 자체의 특성뿐만 아니라 PCB 패턴에 의해 발



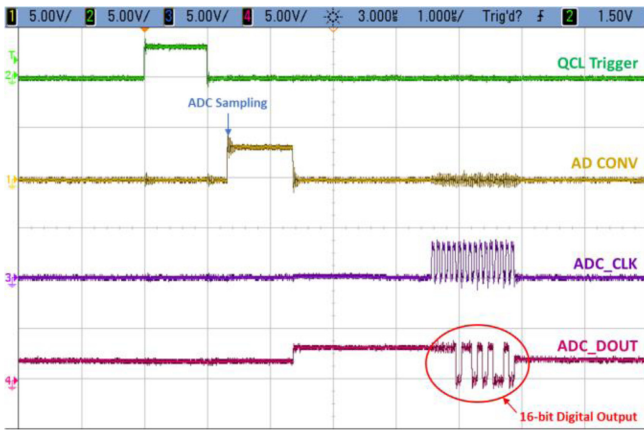


Fig. 7. ADC control input and data output waveforms shown with trigger signal

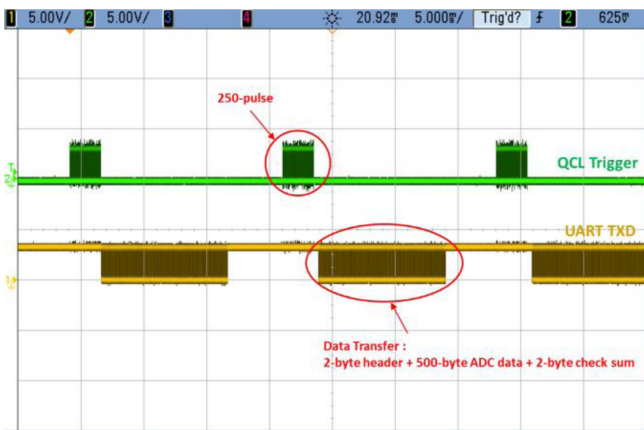


Fig. 8. Waveforms of ADC data transferred via UART and trigger signal with 250-pulse

생하는 기생 요소에 기인하는 것으로 생각된다.

이런 적분기의 초기화 지연은 ADC의 샘플링 시점을 정하는 데 심각한 영향을 준다. 즉, 트리거 신호의 하강 에지 직전에 적분 신호를 샘플링 하면 Fig. 6에서 보듯이 실제 적분 결과보다 상당히 작은 값을 샘플링 하게 되어 전체 시스템의 신호대 잡음비 (SNR, signal to noise ratio)가 나빠진다. 따라서 최적의 ADC 샘플링 시점을 정할 필요가 있는데 이는 실험적 방법을 통해 결정하였다.

Fig. 7은 실제 ADC 제어 입력인 AD\_CONV와 데이터 출력인 ADC\_CLK 및 ADC\_DOUT을 트리거 신호 QCL Trigger와 함께 나타낸 것이다. AD\_CONV 신호의 상승 에지에서 ADC 샘플링이 이루어 지는데, 트리거 신호의 하강 에지 후 540ns의 초기화 지연보다 조금 짧은 지연 시간을 가지고 ADC 샘플링이 수행됨을 알 수 있다. 이러한 방법을 통해 MCT 광검출기 출력 신호의 적분, 아날로그-디지털 변환, 결과 데이터의 메모리 저장을 QCL 트리거 신호의 한 주기 내에 성공적으로 수행하였다.

마지막으로, 상기 일련의 과정을 하나의 QCL 파장에 대해 250

회 반복하게 되고, 이렇게 얻어진 데이터는 압축과정을 거쳐 MCU의 UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)를 통해 전송된다. 데이터 압축은 단순히 데이터를 5개 단위로 평균하거나 다운-샘플링 (down-sampling) 하는 방법으로 수행하였다. Fig. 8은 하나의 QCL 파장에 대한 250개의 트리거 신호와 약 15ms의 QCL 파장 조정 기간 동안 전송되는 데이터 파형을 몇 개의 파장에 대해 연속적으로 나타낸 것이다. MCU의 UART를 통해 전송되는 데이터는 각 2-바이트 (byte)의 데이터 헤더 (header) 및 체크-섬 (check-sum)과 500-바이트의 ADC 데이터로 구성되며, USB 변환기를 이용하여 PC 인터페이스를 수행하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 화학작용제 검출기에 적용하기 위해 증폭기 내 장형 MCT 중파장 적외선 광검출기의 리드아웃 회로를 제안하고자 한다. 설계된 리드아웃 회로는 스위치-커패시터 기반의 적분기, 완전 차동 ADC 드라이버 기능의 전압 레벨 슈프터, ADC, USB 컨버터, MCU 및 주변회로로 구성되며, 이들은 인쇄회로기판 위에 구현되었다. 이렇게 설계 및 제작된 리드아웃 회로에 대한 평가는 QCL 트리거 신호 및 MCT 광검출기 신호를 인가하고 오실로스코프를 이용하여 중요한 아날로그 및 디지털 신호를 측정하는 방법으로 수행되었다. 이러한 방법을 통해 제안된 리드아웃 회로는 8 um에서 12 um까지 0.2 um 간격으로 각 파장에 대해 250번 방출된 QCL에 해당하는 MCT 광검출기의 신호를 빠짐없이 정확하게 읽어내어 데이터 연산을 수행하는 PC로 정확하게 전달하는 것을 확인하였다.

향후에는 본 논문에서 제안된 리드아웃 회로를 최적화 및 안정화하고 이와 더불어 QCL 드라이버를 설계하고 구현할 계획이다. 최종적으로는 리드아웃 회로, QCL 드라이버 및 데이터 처리 장치를 포함하는 임베디드 시스템의 형태로 화학작용제 검출기의 모든 전자 장치를 통합하고자 한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 R&D 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구입니다. [NRF-2020M3D1A2085425, R/G/B 대응 할라이드계 페로브스카이트 소재기반 컬러필터가 필요 없는 적층형 이미지센서 개발 연구]

#### REFERENCES

[1] A. Mukherjee, S. Von der Porten, and C. K. N. Patel, "Standoff detection of explosive substances at distances of

- up to 150m”, *Appl. Opt.*, Vol. 49, No.11, pp. 2072-2078, 2010.
- [2] M. Lee, E. Chong, Y. S. Jeong, H. Nam, and M. K. Park, “Hybrid Operation Concept with Chemical Detection UVA and Stand-off Chemical Detector and Toxic Chemical Cloud Detection”, *J. KIMST*, Vol. 23, pp. 302-309, 2020.
- [3] P. Lagueux, A. Vallieres, A. Villemaire, M. Chamberland, V. Farley, and J. Giroux, “Chemical agent detection and identification with a hyper spectral imaging infrared sensor”, *Proc. SPIE*, Vol. 7486, pp. 74860C(1)–74860C(12), 2007.
- [4] V. Farley, C. Belzile, M. Chamberland, J. F. Legault, and K. R. Schwantes, “Development and testing of a hyper-spectral imaging instrument for field spectroscopy”, *Proc. SPIE*, Vol. 5546, pp. 29-36, 2004.
- [5] X. Xia, L. Xie, and W. Sun, “A high performance CMOS readout integrated circuit for IRFPA”, *Proc. SPIE*, Vol. 6621, pp. 662110(1)–662110(6), 2008.
- [6] J. P. Chamonal, E. Mottin, P. Audebert, M. Ravetto, and J. P. Chatard, “Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high-resolution imaging”, *Proc. SPIE*, Vol. 4130, pp. 452-462, 2000.