Journal of Radiation Industry 12(1) : 7~10(2018)

어레이 타입 실리콘 광전증 배관의 신호 보상을 위해 밀러 효과를 이용한 입력 회로 시뮬레이션

권 인 용[1,*]

[1]한국원자력연구원 원자력ICT연구부

Simulation Results of Signal Compensation Circuit using Miller Effect for Array-Type SiPM Sensors

Inyong Kwon[1,*]

[1]*Nuclear ICT Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - This work presents a novel configuration of front-end circuits for array-type SiPM-based radiation detectors to enable multiplexing to reduce the effective number of readout channels while maintaining high quality pulse information. The major component of the proposed configuration, a bootstrap amplifier exploiting the Miller effect, keep the same AC voltages of two sides of a detector, resulting in no effective detector capacitance between the nodes. This technique ideally allows combining channels without any performance degradation in terms of rise time and amplitude of signals that can be caused due to the accumulated capacitance when detectors are shorted in parallel in a signal multiplexing scheme. In order to verify the configuration, we designed and built a test board inserting a unity-gain amplifier between a 16-pixel SiPM array and a conventional charge-sensitive amplifier as a preamplifier. The simulated pulses at the output of the front-end system show that the bootstrap technique can successfully mitigate performance degradation of rise time and amplitude. This technique can be adopted in many applications that require a multiplexed readout of a large area of photodetectors, for instance, in cargo scanning technologies, radiation monitoring in nuclear plant facilities or developing advanced medical imaging instruments such as PET and SPECT.

Key words : Bootstrap technique, Miller effect, Multiplexing scheme, Radiation detector, Readout circuit

서 론

현대에 이르러 실리콘 광전자증배기(SiPM: Silicon Photomultiplier)가 전통적인 광전자증배관(PMT: Photomultiplier Tube)을 빠르게 대체하면서 많은 방사선 계측에 관련된 영역에서 사용되고 있다. 이는 가장 최신의 광전자증배관이 보통 40% 수준의 양자 효율(Quantum Efficiency) 성능을 보여주는 데 반하여 실리콘 광전자증배기의 경우 80% 이상의 높은 양자 효율이 가능하게 되었기 때문이다(다만 SiPM의 성능은 photon detection efficiency = 양자효율 × 가이거 확률 × Fill factor도 고려하여야 한다). 여기에 더하여 PMT는 고전압(수백~수천 볼트)이 필요하지만 SiPM의 경우 수십 볼

* Corresponding author: Inyong Kwon, Tel. +82-42-868-4925, Fax. +82-42-868-8034, E-mail. ikwon@kaeri.re.kr

Table 1. The specification of SiPM (SensL MicroFJ-30035-TSV) used in this simulation

Parameter	Min.	Typical	Max.	Units
Breakdown voltage (Vbr)	24.2		24.7	V
Overvoltage (OV)	1		6	V
Operating voltage (Vop = Vbr + OV)	25.2		30.7	V
Spectral range	200		900	nm
Peak PDE wavelength (λp)		420		nm
Temperature dependence of Vbr		21.5		$mV \cdot °C^{-1}$

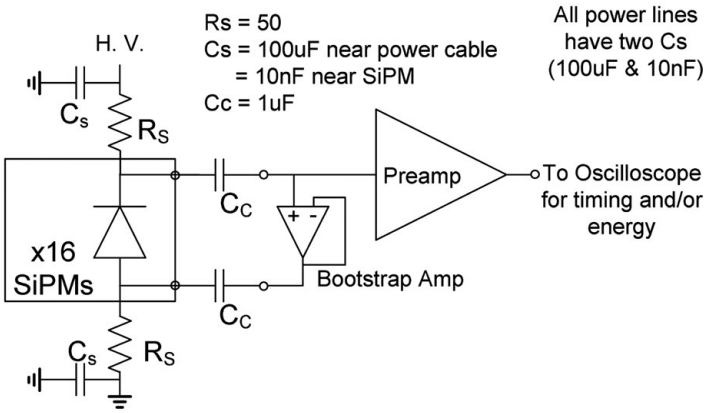

Fig. 1. Configuration of the proposed multiplexing method for an array of 16 SiPMs with bootstrap compensation.

트 수준의 저전력이고 매우 작은 크기로 제작이 가능할 뿐만 아니라 생산 비용 또한 점차 작아져 대량생산에 더욱 강점을 띄게 되었다.

최근 들어 이러한 실리콘 광전자증배기의 우수한 성능으로 고에너지 물리 실험, 원자력 보안, 첨단 방사선 의료기기인 양전자방출단층촬영기 (PET: Positron Emission Tomography)와 단일광자방출전산단층촬영기 (SPECT: Single-Photon Emission Computed Tomography) 등 다양한 분야에 널리 이용되고 있다. 그런데 이렇게 센서가 소형화 되고 성능이 좋아짐에 따라 이용되는 센서의 숫자가 급속히 증가해 왔는데 이러한 수많은 출력 신호를 효과적으로 수집하기 위해서 혁신적인 신호 복합법 (Multiplexing)이 개발되었다 (Downie *et al*. 2013; Kwon *et al*. 2014; Vinke *et al*. 2015). 그러나 기존의 방법들은 일정 부분 신호의 SNR (Signal-to-Noise Ratio)이나 전달 시간이 늘어나는 등 성능의 감쇠를 감수해야만 했다. 특히, 다수의 광전자증배기의 여러 출력 신호가 함께 묶여서 다음 단계의 입력부로 전달될 때 필연적으로 증가하는 센서의 내부 정전 용량이 그 원인이었다.

이러한 대용량 센서 정전 용량에 따른 성능 감쇠를 해결하기 위하여 밀러 효과 (Miller Effect)를 활용한 보상회로가 Charge-Sensitive Preamplifier (CSA)와 함께 제안되었다 (Kwon *et al*. 2015). 본 기술은 밀러 효과를 통한 센서 양단의 실질 정전 용량을 최소화시켜 정전 용량 절대값이 큰 단일 대면적 센서 출력 신호의 크기와 전달 시간을 보존할 수 있다.

이 논문에서는 해당 기술을 응용하여 SiPM에 적용하였고 Spice 시뮬레이션 결과를 통하여 그 가능성을 입증하였다.

재료 및 방법

전통적으로 방사선 센서의 신호처리는 CSA와 같은 전치 증폭기를 사용하여 왔다. 이러한 전치 증폭기의 역할은 센서에서 생성되는 소량의 전하들을 전압으로 바꾸어 주는 역할뿐만 아니라 적절한 크기로 변환시켜 주어 다음 단인 Analog-to-Digital Converter (ADC)나 디지털 프로세서에서 신호처리를 가능하게 한다. 이러한 기본적인 변환에서 최종 출력 전압은 $V_{ini} = Q/C_D$의 기본 식으로 표현되며 이때 Q는 방사선 충격에 의해 센서 내부에서 생성되는 전하량을 뜻하고 C_D는 센서의 내부 정전 용량을 뜻한다. 일반적인 전치 증폭기를 사용할 경우 SiPM의 출력 신호를 통합할수록 전치 증폭기에서 센서 쪽으로 바라보는 정전 용량 값이 증가하게 되어 출력 전압 V_{ini}는 필연적으로 감쇠하게 된다.

이를 해결하기 위해 새로운 형태의 센서 및 전치 증폭기 구성도를 Fig. 1과 같이 고안하였다. 이때 테스트를 위해 사용된 SiPM 은 4×4 배열의 SensL사에서 제조한 제품 (MicroFJ-30035-TSV)을 사용하였다. 본 연구 결과의 독

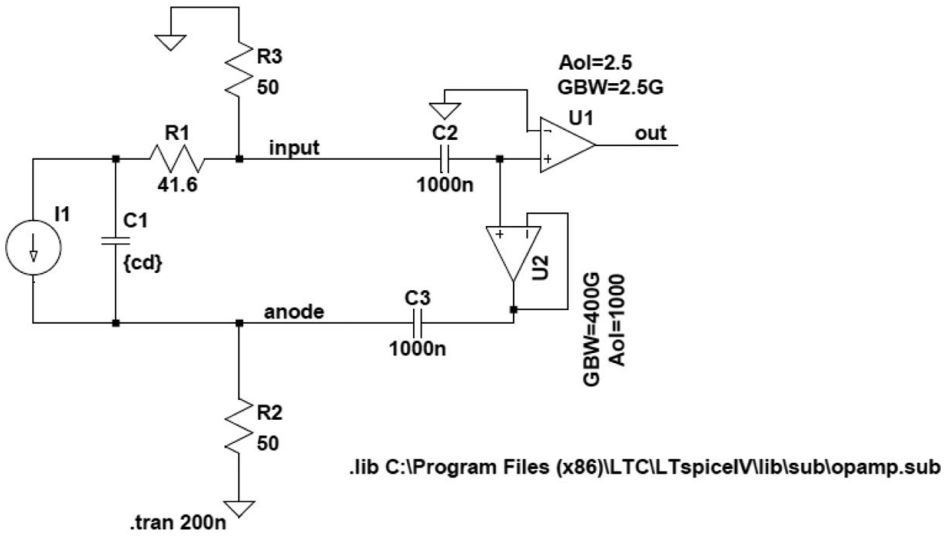

Fig. 2. Circuit simulation configuration with different detector capacitance based on multiplexing ratios of the SiPM.

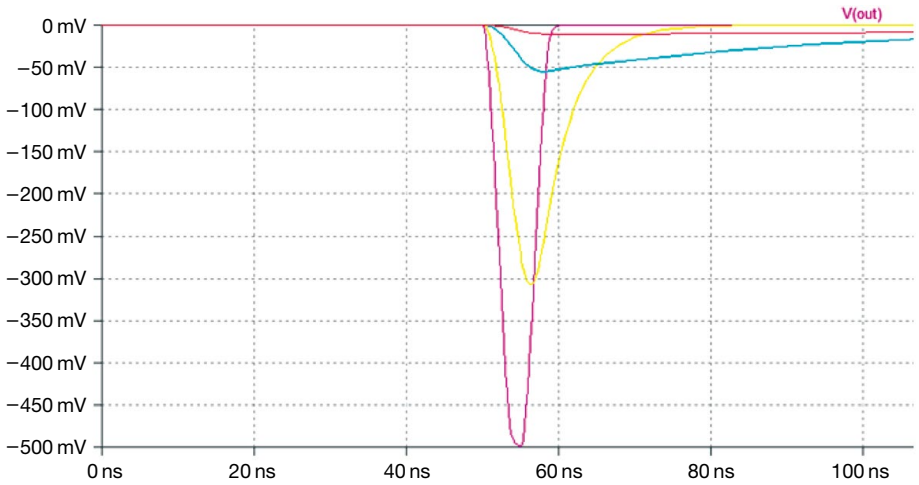

Fig. 3. Non-compensation without the bootstrap technique.

창성은 SiPM 센서의 양단에 연결되는 Bootstrap Amplifier (AD820을 사용하여 Unity Gain Feedback 구조를 만듦)로서 밀러 효과를 이용하여 센서 양단의 전압 차이를 상쇄시켜 주고 결과적으로 센서 내부 캐패시터는 전위차가 형성되지 않아 가상적으로 정전 용량이 0인 것처럼 보이게 해준다. 다만 일반적인 SiPM에서는 Quenching Resistor가 내재되어 있기 때문에 신호 보상 수준이 다소 감소할 수 있다.

결 과

센서 내부 정전 용량 값의 변화에 따른 출력 신호 보상의 정도를 보기 위하여 다양한 복합 비율을 사용하였다. 가상의 복합 비율에 따라 근사화된 센서 내부 정전 용량은 각각 10 pF (만약 매우 작은 크기의 정전 용량을 가진 센서라고 가정했을 때), 100 pF (보통의 단일 면적 방사선 센서의 내부 정전 용량을 근사화했을 때), 1900 pF (5개의 SiPM 내부 정전 용량에 주변 기생 정전 용량을 합산하였을 때), 5760 pF (16개의 SiPM 내부 정전 용량에 주변 기생 정전 용량을 합산하였을 때)로 세분화하여 Spice 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 2은 제안된 보상회로를 시뮬레이션 툴에 구현한 것으로 U2가 인가되면 보상회로로서 동작하고 U2를 비인가(disable)하면 일반적인 출력 신호를 내보내게 된다. 우선 보상회로를 비인가 하였을 때 신호는 Fig. 3과 같이 나타난다. 각각의 내부 정전 용량에 따라 10 pF은 자주색, 100 pF은 노란색, 1900 pF은 하늘색, 마지막으로 5760 pF은 빨간색을 나타낸다. 그래프를 분석하면 명확하게 정전 용량이 증가할수

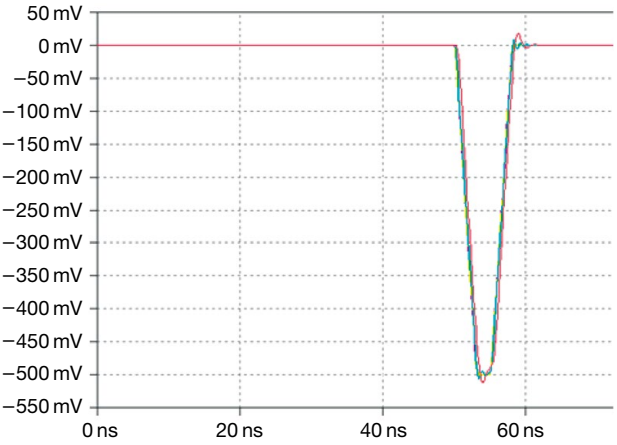

Fig. 4. Successfully compensated output signals with the enabled bootstrap technique.

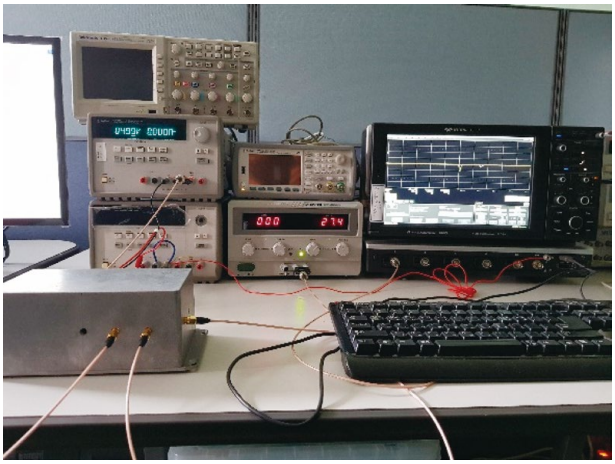

Fig. 5. Photo of the measurement configuration including array-type SiPM sensor (in the aluminum box), voltage suppliers, and oscilloscope.

록 신호의 크기는 감쇠하고 상승 시간(Rise Time)은 점점 늘어지는 것을 볼 수 있다.

신호 보상회로를 인가하였을 때 그래프는 Fig. 4와 같이 모든 신호가 성공적으로 보상이 되어 10 pF일 때와 비슷한 모습으로 거의 동일하게 겹쳐져 있는 것을 확인할 수 있다.

고 찰

본 연구 방법론을 통하여 새로운 형태의 다중 SiPM 신호 처리 보상회로를 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 그 가능성을 입증하였으며 이를 활용하면 수천 개의 센서가 들어가는 PET이나 컨테이너 방사선 검색기와 같은 기기에서 출력 신호의 수를 획기적으로 줄일 수 있는 신호 입력 회로를 설계할 수 있다. 이를 통해 신호의 크기와 전달 시간에 대한 손실 없이 필요한 정보들을 효과적으로 획득할 수 있을 것이다. 후에 실제 보상회로의 동작을 관측하기 위하여 ^{60}Co 나 ^{137}Cs 등 표준 선원을 사용하여 형광체 및 SiPM의 신호를 획득할 계획이다. 이를 위해 SiPM의 Dark Current 측정을 위한 In-Lab 실험이 Fig. 5와 같이 진행 중에 있다.

결 론

본 논문에서 제안된 센서 방법을 통하면 신호의 크기 및 전달 시간의 감쇠 없이 출력 신호 숫자를 줄일 수 있는 장점이 있다. 특히나 본 방법은 센서 자체에 부담을 주지 않고 입력 전자회로 부분의 변경을 통화여 그 효과를 볼 수 있다. 이는 다양한 응용 분야에도 즉각적인 적용이 가능하다. 특히나 의료기기나 대형 검측기와 같이 수천 개의 센서가 필요하거나, 복잡한 신호처리부를 간소화 시키고 경량화시킬 필요가 있을 때나, 전력 소모를 줄이고자 할 때 유용하게 이용될 수 있다.

본 논문에서 제안된 신호 보상회로를 더욱 보완 및 발전시키고 최적화를 통하여 실질적인 응용 분야에 쓰일 수 있도록 관련 연구를 지속할 계획이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 지원으로 수행되었습니다 (NRF-2017M2A8A4056388).

참 고 문 헌

Downie E, Yang X and Peng H. 2013. Investigation of analog charge multiplexing schemes for SiPM based PET block detectors. *Phys. Med. Biol.* **58**(11):3943-3964.

Kwon I, Kang T, Wells BT, D'Ariesc LJ and Hammig MD. 2015. Compensation of the detector capacitance presented to charge-sensitive preamplifiers using the Miller effect. *Nucl. Instrum. Meth. A* **784**(1):220-225.

Kwon S and Lee J. 2014. Signal encoding method for a time-of-flight PET detector using a silicon photomultiplier array. *Nucl. Instrum. Meth. A* **761**:39-45.

Vinke R, Yeom J and Levin C. 2015. Electrical delay line multiplexing for pulsed mode radiation detectors. *Phys. Med. Biol.* **60**(7):2785-2802.

Received: 6 September 2017
Revised: 23 December 2017
Revision accepted: 20 January 2018