출력 전압 피드백을 통한 능동 화소 센서의 동작 범위 확장

서민웅 · 서상호 · 공재성 · 신장규*

Dynamic range expansion of active pixel sensor with output voltage feedback

Min-Woong Seo, Sang-Ho Seo, Jae-Sung Kong, and Jang-Kyoo Shin*

Abstract

In this paper, a wide dynamic range active pixel sensor(APS) with output voltage feedback structure has been designed by a 2-poly 4-metal 0.35 μm standard CMOS technology. We presented a novel APS with output voltage feedback, which exhibits a wide dynamic range. The dynamic range increases at the cost of an additional diode and an additional MOSFET. The output voltage feedback structure enables the control of the output voltage level by itself, as incident light power varies. It is confirmed that the light level which the output voltage level of proposed APS is saturated is about 120,000 lux, which is higher than that of a conventional 3-transistor APS.

Key Words : CMOS image sensor, APS, feedback structure

1. 서 론

현대의 정보통신 사회에 있어서 카메라는 여러 분야에 사용이 되고 있다. 아날로그 카메라에서는 피사체를 기록하기 위하여 필름을 사용하는 반면, 디지털 카메라에서는 필름의 역할을 하는 전하 결합 소자(charge coupled device, CCD)형 이미지 센서와 상보형 금속 산화물 반도체(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 이미지 센서를 사용하고 있다^[1-4].

CMOS 이미지 센서는 표준 CMOS 공정을 통하여 제작이 가능하므로 제조 단가가 CCD형 이미지 센서에 비해 낮다. 그리고 이미지 센서의 구동에 필요한 신호 처리 회로들의 집적화(system-on-chip, SoC)가 가능하다. 또한 원하는 화소에 임의의 접근이 가능하다. 그리고 CCD형 이미지 센서와는 다르게 높은 전원 전압과 다양한 전압 레벨이 필요하지 않아 저전력화가 가능하다. 이러한 CMOS 이미지 센서의 특성들로 인해 CCD형 이미지 센서보다 CMOS 이미지 센서가 휴대용기기들에 사용되기에 더 적합하며, 현재 많은 분야에서

CMOS 이미지 센서가 CCD형 이미지 센서를 대체하여 사용되어지고 있다^[2,4]. 하지만 공정 기술의 발전과 다양한 연구를 통한 CMOS 이미지 센서의 성능 개선에도 불구하고 CMOS 이미지 센서는 CCD형 이미지 센서에 비해 감도가 낮고, 잡음이 많으며, 동작 범위(dynamic range)가 좁다는 등의 문제점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 다양한 방안들이 여러 연구기관에서 연구되어지고 있다^[5-13].

본 연구에서는 단위 픽셀 내에 하나의 다이오드와 하나의 MOSFET을 더 사용하여 고조도에서의 동작 범위를 향상시켰을 뿐만 아니라 저조도에서의 광감도(photo sensitivity) 저하를 억제시켰다^[12]. 제안한 이미지 센서는 Synopsis 社の HSPICE를 이용하여 모의 실험을 하였고, IDEC(integrated circuit design education center) MPW(multi-project wafer)의 0.35 μm 2-poly 4-metal CMOS 표준 공정을 통하여 제작하고, 그 특성을 측정하였다.

2. 이론 및 동작 원리

Fig. 1은 일반적인 3-트랜지스터 능동화소센서(active pixel sensor, APS)의 회로도이고^[12], Fig. 2는 본 연구에서 제안한 APS의 회로도이다. Fig. 1과 Fig. 2의 회로 모두 기본적으로 하나의 n-well/p⁺ diffusion 포토

경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

*Corresponding author : jkshin@ee.knu.ac.kr

(Received : January 19, 2009, Revised : April 6, 2009)

Accepted : May 25, 2009)

Fig. 1. Schematic of the conventional 3-transistor APS.

Fig. 2. Schematic of the proposed APS.

다이오드(PD)와 세 개의 MOSFET으로 구성되어 있는 3-transistor APS 구조이고^[14], 제안한 회로의 경우, 하나의 일반적인 다이오드(D_{FB})와 하나의 MOSFET이 추가로 구성이 되어 있다.

본 연구에서 제안한 APS의 동작 원리는 크게 두 부분으로 나누어서 생각을 해볼 수 있다.

첫 번째, 고조도에서의 APS 동작이고, 두 번째는 저조도에서의 APS 동작이다. D_{FB} 는 항상 역방향 바이어스가 걸려있기 때문에 역방향 포화전류가 흐르게 된다. 하지만 이 역방향 포화전류의 크기보다 M_2 를 통해 출력된 전압이 피드백 MOSFET(M_{FB})로 전달되어짐으로써 M_{FB} 가 턴-온이 될 때 D_{FB} 에 의해서 추가되어지는 전하우물용량(well-capacity)의 크기가 동작 범위가 향상되는 데 있어서 지배적인 영향을 미치게 된다. 즉, 고조도에서는 더 큰 출력 전압이 피드백되므로 M_{FB} 가 강하게 턴-온이 되어 순간적으로 추가되는 전하우물용량이 커지고 저조도에서는 상대적으로 작은 전압이 피드백되므로 M_{FB} 가 약하게 턴-온이 되어 순간적으로 추가되는 전하우물용량이 작아지게 된다. 그 결과, D_{FB} 에

Fig. 3. Layout of the proposed APS.

Fig. 4. Photograph of the fabricated chip on a PCB package.

의해서 추가된 전하우물용량의 크기만큼 제안한 APS의 동작 범위는 넓어지게 된다.

Fig. 3은 제안한 APS의 레이아웃이다. 일반적인 다이오드의 면적이 포토 다이오드의 면적에 비해서 더 작은 것을 확인할 수 있다. 추가로 구성이 된 M_{FB} 와 D_{FB} 의 크기는 각각 $11.475 \mu\text{m}^2$ 와 $7.3 \mu\text{m}^2$ 이며, 추가적인 소자들로 인해서 전체 픽셀 크기가 기존의 $9.3 \times 9.3 \mu\text{m}^2$ 에서 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ 로 증가되었다. 이것은 최적화 작업을 통하여 앞으로 해결해야 할 과제이다.

Fig. 4는 실제 제작된 칩을 PCB(printed circuit board) 위에 와이어 본딩까지 마친 사진이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 모의 실험 결과

Fig. 5는 단위 픽셀의 동작에 사용되는 제어신호로써 V_{RST} 는 전하 집적 노드를 리셋시켜 주기 위한 펄스이고, V_{SEL} 는 소스-팔로워(source follower, M_2) 버퍼를 통하여 출력된 전압을 선택하기 위한 펄스이다. V_{RST} 와 V_{SEL} 의 최대 전압은 모두 3.3 V이다. 뿐만 아니라 모의 실험 조건으로 V_{DD} 는 3.3 V, V_{BIAS} 는 1 V를 인가하였다.

Fig. 6은 일반적인 3-트랜지스터 APS를 모의 실험한

Fig. 5. Control signal of the unit pixel.

Fig. 6. Simulation result of the conventional 3-transistor APS.

Fig. 7. Simulation result of the proposed 3-transistor APS.

결과이고, Fig. 7은 제안한 APS의 모의 실험 결과이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 일반적인 3-트랜지스터 APS의 경우에는 빛의 세기가 1,900 lux에서부터 포화가 시작되는데 반해 제안한 APS의 경우에는 빛의 세기가 2,800 lux가 되어야 포화가 시작되는 것

Fig. 8. Variation of the pixel output with the photo current.

Fig. 9. Block diagram of the measurement method.

을 알 수 있다.

Fig. 8은 빛의 세기가 변함에 따라서 출력 전압의 변화를 나타낸 모의 실험 결과이다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 제안한 APS가 일반적인 3-트랜지스터 APS 보다 더 큰 빛에서 포화되지 않고 동작하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 측정 결과

Fig. 9는 측정 방법을 모식도로 나타낸 것이다. 측정은 Tektronix 社의 TDS3034와 DG2020A를 사용하여 측정하였고, 전원 전압은 3.3 V를 인가하였다. 측정 방법으로는 DG2020A data generator로 리셋과 선택 펄스를 인가하고, TDS3034의 프로브를 제작된 칩의 출력 패드에 연결한 후 조도별 전압을 측정하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 일반적인 3-트랜지스터 APS와 제안한 APS의 빛의 세기에 따른 출력 전압의 측정 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 일반적인 3-트랜지스터 APS의 경우에는 빛의 세기가 68,000 lux 이상에서 출력 전압이 2 V 정도로 포화되지만 제안한 APS의 경우에는 빛의 세기가 120,000 lux가 되어야 출력 전압의 포화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고조도

Fig. 10. Measured waveform of the output voltage of the conventional 3-transistor APS as incident light power varies.

Fig. 11. Measured waveform of the output voltage of the proposed APS as incident light power varies.

에서의 동작 범위가 두 배 가까이 확장이 된 것을 의미한다. 그리고 저조도에서의 특성을 확인해보면, 검출 가능한 최저 빛의 세기인 20,000 lux에서는 일반적인 3-트랜지스터 APS의 출력 전압의 크기가 약 0.2 V일 때, 제안한 APS의 출력 전압은 약 0.1 V로 고조도에서의 동작 범위를 향상시켰을 뿐 아니라 저조도에서의 광감도의 저하 또한 억제시켰음을 확인할 수 있다. 모의 실험 결과와 빛의 세기에서 차이가 많이 나타나는 것은 제작된 칩이 이미지 센서 전용 공정으로 제작되었기 때문이 아니라 CMOS 표준 공정을 통하여 제작되었기 때문에 포토 다이오드의 성능차이에서 비롯된 것으로 공정을 개선함으로써 극복이 가능하다.

본 연구에서의 측정 조건인 리셋과 선택 펄스의 너비는 각각 100 μ s이고, 총주기는 700 μ s이다.

Fig. 12는 빛의 세기가 변환에 따라서 출력 전압의 변화를 나타낸 측정 결과이다. Fig. 12에서 확인할 수

Fig. 12. Variation of the output voltage of the conventional 3-transistor APS and the proposed APS the incident light power varies.

있듯이 제안한 APS가 일반적인 3-트랜지스터 APS보다 조도의 세기가 더 큰 빛에서 포화되지 않고 동작하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12에서 보면 포화되는 최대 전압 크기에서 일반적인 3-트랜지스터 APS는 약 2.0 V이고 제안한 APS의 경우에는 약 1.93 V로 0.07 V 정도의 차이를 보이고 있다. 그 이유는 일반적인 3-트랜지스터 APS의 기생 커패시턴스보다 제안한 APS는 일반적인 다이오드 하나를 추가적으로 사용하고 있기 때문에 전하 집적 노드의 기생 커패시턴스에서 일반적인 다이오드에 의한 커패시턴스 성분이 더해지게 된다.

$$V_{\text{integration}} = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} i_d dt \quad (3-1)$$

식(3-1)을 보면, 제안한 APS의 커패시턴스의 크기가 더 크므로 $V_{\text{integration}}$ 의 크기가 일반적인 3-트랜지스터 APS와 차이가 발생되어지는 것임을 알 수 있다. 이 전압의 차이는 향후 연구에 의한 픽셀 설계의 최적화로 극복이 가능하다.

4. 결 론

본 논문에서는 출력 전압을 피드백하여 동작 범위를 향상시킨 새로운 구조의 APS를 제안하였다. 제안한 구조는 고조도에서 동작 범위를 향상시킬 뿐만 아니라 저조도에서 광감도를 크게 저하시키지 않는 효과도 얻을 수 있다. 본 연구에서는 제안한 회로에 대해서 Synopsis 社の HSPICE를 이용한 모의 실험을 수행한

후, 0.35 μm 2-poly 4-metal CMOS 표준 공정을 통해 칩을 제작하고 그 특성을 측정하였다. 측정 결과 일반적인 3-트랜지스터 APS는 약 68,000 lux에서 출력 전압이 포화되는 반면, 본 연구에서 제안한 APS는 약 120,000 lux에서 출력 전압이 포화되었다. 이로부터 본 연구에서 제안한 피드백 구조를 사용한 APS는 일반적인 3-트랜지스터 APS보다 동작 범위가 향상되었으며, 본 연구에서 제안한 APS를 통해 더 넓은 동작 범위를 갖는 CMOS 이미지 센서에 적용이 가능하다.

감사의 글

이 논문은 BK21, IDEC(integrated circuit design education center), 그리고 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2009-0063401).

참고문헌

- [1] S. K. Mendis, S. E. Kemeny, and E. R. Fossum, "CMOS active pixel image sensor", *IEEE Trans. Elect. Dev.*, vol. 41, no. 3, pp. 452-453, 1994.
- [2] E. Fossum, "CMOS image sensor : electronic camera on a chip", *IEEE Trans. Elect. Dev.*, vol. 44, no. 10, pp. 1689-1698, 1997.
- [3] S. K. Mendis, S. E. Kemeny, R. C. Gee, B. Pain, C. O. Staller, Quiesup Kim, and E. R. Fossum, "CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 2, pp. 187-197, 1997.
- [4] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, and J. Salvi, "Review of CMOS image sensors", *Microelectronics Journal*, vol. 37, pp. 433-451, 2006.
- [5] D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo, M. Gottardi, and G-F Dalla Betta, "Novel CMOS image sensor with a 132-dB dynamic range", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 37, no. 12, pp. 1846-1852, 2002.
- [6] W-J Liu, H-F Yeh, and Oscar T.-C. Chen, "A high dynamic-range CMOS image sensor with locally adjusting charge supply mechanism", *Circuits and Systems, 48th Midwest Symposium on*, vol. 1, pp. 384-387, 2005.
- [7] N. Akahane, S. Sugawa, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, "A sensitivity and linearity improvement of a 100-dB dynamic range CMOS image sensor using a lateral overflow integration capacitor", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 4, pp. 851-858, 2006.
- [8] G. Storm, R. Henderson, J. E. D. Hurwitz, D. Renshaw, K. Findlater, and M. Purcell, "Extended dynamic range from a combined linear-logarithmic CMOS image sensor", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 9, pp. 2095-2106, 2006.
- [9] K. Hara, H. Kubo, M. Kimura, F. Murao, and S. Komori, "A linear-logarithmic CMOS sensor with offset calibration using an infected charge signal", *ISSCC Digest of Technical Papers*, vol. 1, pp. 354-355, 2005.
- [10] S. Shafie, S. Kawahito, and S. Itoh, "A dynamic range expansion technique for CMOS image sensors with dual charge storage in a pixel and multiple sampling", *MDPI Sensors 2008*, vol. 8, pp. 1915-1926, 2008.
- [11] M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, Y. Wakamori, and M. Furuta, "A wide dynamic range CMOS image sensor with multiple exposure-time signal outputs and 12-bit column-parallel cyclic A/D converters", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 12, pp. 2787-2795, 2005.
- [12] S. H. Seo, J. H. Park, J. K. Lee, I. S. Wang, J. K. Shin, Y. C. Jo, and H. Kim, "Characteristics of a PMOSFET photodetector for highly-sensitive active pixel sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 12, no. 4, pp. 149-155, 2003.
- [13] H. J. Yoon, J. H. Park, S. H. Seo, S. H. Lee, M. Y. Do, P. Choi, and J. K. Shin, "A CMOS active pixel sensor with embedded electronic shutter and A/D converter", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 14, no. 4, pp. 272-277, 2005.

서민웅

- 2007년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 2009년 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부(공학석사)
- 현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정
- 주관심 분야: CMOS image sensor, analog circuit design

서상호

- 센서학회지 제12권, 제4호, p. 149 참조
- 2009년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 초빙교수

공재성

- 2002년 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 2005년 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 2008년 경북대학교 전자공학과(공학박사)
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사 후 연구원
- 주관심 분야: CMOS image sensor, bio-inspired vision chip, and its applications

신장규

- 센서학회지 제3권, 제1호, p. 26 참조
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수