온칩 다이오드를 이용한 빛에너지 하베스팅 회로 설계

윤은정* · 황인호* · 박준호** · 박종태** · 유종근***

Design of a Photo Energy Harvesting Circuit Using On-chip Diodes

Eun-jung Yoon* · In-ho Hwang* · Jun-ho Park** · Jong-tae Park** · Chong-gun Yu***

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

요 약

본 논문에서는 CMOS 공정의 p-diff/n-well 다이오드만을 사용한 ISC(Integrated Solar Cell)를 이용하여 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 갖는 온칩 빛에너지 하베스팅 시스템을 제안하였다. MPPT 제어는 PV(Photovoltaic) 셀의 개방전압과 MPP(Maximum Power Point) 전압간의 비례관계를 이용하여, 작은 pilot PV 셀로 하여금 main PV 셀의 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 설계하였다. 모의실험 결과 설계된 회로는 MPPT 제어기능을 적용했을 때 부하가 큰 경우에도 MPP 근처의 전압을 부하에 공급함으로써 부하에 연결된 회로가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 제안된 회로는 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계하였으며, main PV 셀과 pilot PV 셀의 면적은 각각 8mm²와 0.4mm²이다.

ABSTRACT

In this paper an on-chip photo energy harvesting system with MPPT(Maximum Power Point Tracking) control is proposed. The ISC(Integrated Solar Cell) is implemented using p-diff/n-well diodes available in CMOS processes. MPPT control is implemented using the linear relationship between the open-circuit voltage of a PV(Photovoltaic) cell and its MPP(Maximum Power Point) voltage such that a small pilot PV cell can track the MPP of a main PV cell in real time. Simulation results show that the designed circuit with the MPPT control delivers the MPP voltage to load even though the load is heavy such that the load circuit can operate properly. The proposed circuit is designed in 0.18 μ m CMOS process. The designed main PV cell and pilot PV cell occupy 8mm² and 0.4mm² respectively.

키워드

에너지 하베스팅, MPPT, 솔라 셀, 전하펌프

Key word

Energy harvesting, MPPT, PV cell, Charge pump

* 준회원 : 인천대학교
** 정회원 : 인천대학교
*** 종신회원 : 인천대학교 (교신저자, chong@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 11. 09
심사완료일자 : 2011. 12. 13

I. 서 론

에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술은 USN(Ubiquitous Sensor Network)의 센서노드와 같은 저전력 무선 전자장치의 반영구적 전원으로 사용될 수 있으며, 기존의 배터리를 대체할 수 있는 기술로써 최근에 많은 관심을 받으며 연구가 진행되고 있다. 에너지 하베스팅은 주로 빛, 진동, 열 등 주변의 버려진 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술로 친환경적이라는 점에서 더욱 주목을 받고 있다[1~3].

빛에너지는 태양, 조명등에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 에너지이며 상대적으로 변환 효율이 높기 때문에 오래전부터 연구 개발이 진행되어 왔다. 그러나 기존의 빛 에너지 하베스팅 시스템의 경우 에너지 변환 소자로 대부분 off-chip PV(Photovoltaic) 셀을 이용하고 있다[1],[4]. Off-chip PV 셀은 효율이 높다는 장점은 있으나, 가격이 비싸고, 다른 회로와의 집적화가 어렵기 때문에 시스템의 소형화가 어렵다는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 초소형 센서노드를 대상으로 하기 때문에 빛 에너지 변환 소자를 CMOS 공정의 포토다이오드(photodiode)를 이용하여 ISC(Integrated Solar Cell) 형태로 구현함으로써 다른 회로와 집적화하도록 하였다.

기준에 표준 CMOS 공정을 이용한 ISC 구현 방법으로는 p-diff/n-well 다이오드를 이용하는 방법[5], p-diff/n-well 다이오드와 p-sub/n-well 다이오드의 병렬연결을 이용하는 방법[6], 그리고 p-diff/n-well 다이오드와 p-sub/n-well 다이오드의 직렬연결을 이용하는 방법[7] 등이 있다.

첫 번째 방법은 가장 기본적인 ISC 구현 방법으로 n-well을 가장 낮은 전위를 갖는 p-sub에 연결하여 ISC와 함께 집적되는 회로에 전력을 공급하게 된다. 그러나 단락된 기생(parasitic) p-sub/n-well 다이오드로 인해 ISC에서 발생된 전류의 감소로 효율이 감소하는 단점이 있다[5]. 또한 이러한 기판(substrate)의 기생다이오드로 인해 p-diff/n-well 다이오드의 직렬연결이 불가능하기 때문에 ISC에서 얻을 수 있는 최대 개방(open) 출력전압은 약 0.5V 정도로 작다는 단점이 있다.

두 번째 방법은 하베스터(harvester) 다이오드(p-diff/n-well)와 기생 다이오드(p-sub/n-well)를 병렬 연결하여 사용하기 때문에 단위 면적당 에너지 변환 효율(225uW/

mm² @20klux)이 높다는 장점을 갖는다. 그러나 이러한 병렬구조의 ISC는 기판 바이어스 문제 때문에 다른 회로와 같은 기판에 집적화가 불가능하다.

세 번째 방법은 ISC에서 발생하는 전압을 키우기 위해 두 개의 다이오드(p-diff/n-well, p-sub/n-well)를 직렬 연결하여 최대 0.83V의 전압과 6.1mm²/uW@2klux의 변환율을 얻었으나, 다른 회로와의 집적화시 기판 바이어스 문제로 트랜지스터의 문턱전압(threshold voltage)이 감소하고 누설전류(leakage current)가 증가하는 문제점을 보였다.

빛에너지는 항상 일정하지 않고 조도와 온도 등 주변 환경 변화에 따라 PV cell에서 출력되는 에너지는 변하게 된다. 따라서 PV cell로부터 최대 가용 전력을 수확하기 위해서는 실시간 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어가 필요하다. 기존의 off-chip PV 셀을 이용한 시스템에서는 수확 가능한 에너지가 비교적 많으며 출력전압이 크기 때문에 주로 복잡한 MPPT 알고리즘을 마이크로컨트롤러나 DSP를 사용하여 구현하였다[8~10]. 그러나 이러한 방법은 많은 비용과 전력이 요구되기 때문에 본 설계의 응용분야에는 적합하지 않다. 최근에 DSP를 사용하지 않고 비교적 간단한 회로 기술로 MPPT 제어를 구현하려는 연구가 이루어지고 있다[1],[4].

ISC의 경우에는 수확 가능한 에너지가 적으며 출력 전압이 작기 때문에 MPPT를 적용한 예가 아직까지는 전무하며, 참고문헌 [11]에서 ISC 구현시 MPPT를 적용하려고 시도하였으나, MPPT 제어회로를 구동하기 위해 전력 공급원으로 p-diff/n-well 다이오드의 직렬연결을 사용하였으며, 기판의 기생 다이오드를 반영하지 않은 상태로 모의실험을 하였기 때문에 실제 구현시 동작여부는 미지수이다.

본 논문에서 처음으로 p-diff/n-well 다이오드만을 사용한 ISC를 이용하여 MPPT 제어 기능을 갖는 온칩 빛 에너지 하베스팅 회로를 제안하고 0.18um CMOS 공정으로 설계하였다. MPPT 제어기능은 PV 셀의 개방전압과 MPP(Maximum Power Point) 전압간의 연관성과 작은 pilot PV 셀을 이용하여 간단히 구현하였다.

II. 회로 설계

2.1. 제안된 온칩 빛에너지 하베스터 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 포함한 온칩 빛 에너지 하베스팅 시스템의 블록도이다. 회로의 구성은 온칩 솔라 셀인 ISC, Voltage booster, SEMC(Solar Energy MPPT Control) 등으로 구성되어 있다. ISC를 p-diff/n-well 다이오드들의 병렬연결로 구현하였기 때문에 ISC에서 출력되는 전압은 최대 0.5V 정도로 SEMC를 구동하기에는 어려움이 있다. Voltage booster는 ISC의 출력전압을 1V 이상으로 증압하여 SEMC에 공급한다. SEMC는 ISC의 출력전압이 MPP 근처($V_{MPP,min} \sim V_{MPP,max}$)에서 동작하도록 하는 MPPT 제어 기능을 하며, ISC로부터 수확된 에너지를 스위치를 통해 부하(load)로 전달하는 역할을 한다.

그림 1. 제안된 온칩 빛에너지 하베스터
Fig. 1 Proposed on-chip photo energy harvester

2.2. Integrated Solar Cell (ISC)

본 논문에서는 그림2와 같이 n-well에 p-diffusion finger를 일정한 간격으로 배치하는 finger 구조의 레이아웃 패턴으로 ISC를 설계하였다. 그림 1의 main PV 셀과 SEMC에 사용되는 작은 크기의 pilot PV 셀 둘 다 같은 패턴으로 설계하였다. 참고문헌[1]에서 1mm^2 의 면적을 갖는 ISC(p-diff/n-well 다이오드)는 $300\text{W}/\text{m}^2$ 의 조도에서 약 $12.3\mu\text{A}$ 의 전류를 생성하는 것으로 보고되었다. 이 연구결과를 바탕으로 본 논문에서는 $100\mu\text{A}$ 의 전류를 발생하는 ISC를 설계하기 위해 PV 셀의 면적을 8mm^2 의 크기로 설계하였다. 설계된 ISC의 등가회로 모델은 그림 3의 왼쪽과 같으며, 이 등가모델이 회로설계 및 검증에 사

용되었다. 여기서 전류원은 빛에 의한 발생된 전류를 나타내며, 다이오드는 n-well과 기판사이에 존재하는 기생 다이오드이다. 두 개의 저항은 ISC 등가모델의 병렬 및 직렬 임피던스 성분을 나타낸다.

그림 2. 설계된 ISC의 레이아웃
Fig. 2 Layout of the designed ISC

설계된 ISC 등가모델의 I-V 특성과 P-V 특성을 그림 3의 오른쪽에 보였다. 설계된 ISC는 480mV 의 개방전압(V_{oc})과 $100\mu\text{A}$ 의 단락전류(I_{sc}) 특성을 보인다. 최대 생성 전력은 $30\mu\text{W}$ 이며 이때 출력 전압과 전류는 각각 $V_{MPP}=375\text{mV}$, $I_{MPP}=90\mu\text{A}$ 이다.

(a)

(b)

그림 3. 설계된 ISC의 (a)등가 모델 (b)I-V(P-V) 특성
Fig. 3 (a)Equivalent model (b)I-V(P-V) characteristics of the designed ISC

2.3. Voltage Booster

Voltage booster는 ISC에서 출력되는 0.5V 이하의 전압 V_{SC} 를 SEMC가 동작하는데 필요한 1V의 이상의 전압 V_{CP} 로 승압하는 역할을 한다. Voltage booster는 그림 4의 링 발진기(ring oscillator)와 버퍼(buffer), 그리고 그림 5의 전하펌프(charge pump) 회로로 구성되어 있다.

그림 4는 전하펌프 동작에 필요한 클록(clock)을 발생시키는 링 발진기와 버퍼이다. 링 발진기는 3단으로 구성하였으며, 출력단에 두 개의 인버터를 추가하여 발진 출력을 개선하고 중첩되지 않는(non-overlapping) 클록을 생성하였다. 인버터 사이에 커패시터를 연결하여 두 출력의 발진 주파수와 duty cycle을 조절하였다. 링 발진기의 출력에는 버퍼 단을 연결하여 비교적 크기가 큰 전하펌프의 단(stage) 커패시터들을 구동하도록 하였다. 설계된 링 발진기의 발진 주파수와 소비전류는 약 2MHz와 800nA이다.

그림 4. 링 발진기와 버퍼
Fig. 4 Ring oscillator and buffer

그림 5는 설계된 dickson 전하펌프 회로이다. 다이오드로 사용된 NMOS 트랜지스터가 뒷단으로 갈수록 body effect의 영향으로 문턱전압(threshold voltage)이 증가하게 된다. 본 설계에서는 ISC의 출력전압(수백 mV)으로부터 1V이상의 승압된 전압을 얻기 위해 전하펌프를 8단으로 구성하였으며, 각 단계에 사용된 커패시터스(C_{stage})는 4pF를 사용하였다. 또한 작은 입력 전압으로부터 트랜지스터가 펌핑(pumping) 동작을 원활히 수행하도록 하기 위해 공정에서 제공하는 medium-Vt 트랜지스터를 사용하였다.

그림 5. 전하펌프 회로
Fig. 5 Charge pump circuit

그림 6은 설계된 전하펌프 회로의 모의실험 결과이다. 전하펌프의 출력단 부하 저항을 변화시키면서 모의 실험한 결과 부하저항이 500kΩ 이상인 경우에 출력전압 V_{CP} 는 1V 이상 승압되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 그림 1에서 보듯이 전하펌프의 실질적인 부하인 SEMC에서 소모되는 전류를 2uA 이하가 되도록 설계해야만 V_{CP} 가 1V 이상을 유지하게 되고 SEMC가 정상 동작하게 된다.

그림 6. 부하저항에 따른 전하펌프 출력전압
Fig. 6 Charge pump output voltage as a function of load resistance

2.4. SEMC (Solar Energy MPPT Control)

그림 7은 SEMC의 블록도이다. SEMU의 구성은 pilot PV 셀과 비교기, 디지털 로직 게이트 등으로 구성되어 있다. Pilot PV 셀은 출력에 연결된 저항 분주기(divider)를 통해 ISC의 MPP 전압에 해당하는 기준전압($V_{MPP,max}$, $V_{MPP,min}$)을 비교기에 공급하는 역할을 한다. 비교기는 pilot PV 셀에서 공급된 기준전압을 main PV 셀의 출력인 V_{SC} 와 비교하여 V_{SC} 가 $V_{MPP,max}$ 또는 $V_{MPP,min}$ 에 도달했는지를 감지한다.

비교기가 감지한 신호를 기반으로 디지털 로직 회로는 enable 신호 V_{EN} 을 발생시켜서, 부하에 전력을 공급하기 위한 전력(power) 스위치(그림 1 참조)의 on/off 상태를 결정하게 된다.

그림 7. SEMC 블록도
Fig. 7 SEMC block diagram

SEMC의 MPPT 제어 동작원리는 다음과 같다.

- ① 먼저 시스템이 빛 에너지를 받게 되면 그림 8에서와 같이 main PV 셀의 출력전압 V_{SC} 가 증가한다.
- ② V_{SC} 가 $V_{MPP,max}$ 에 도달하면($t=t_1$), SEMC가 'EN' 신호를 발생시켜서 전력 스위치를 'on'시키고 부하에 전력을 공급하게 된다.
- ③ 보통의 경우 ISC에서 발생하는 에너지는 부하에서 소모되는 에너지 보다 작기 때문에, 전력 스위치가 'on'되어 있는 동안에는 V_{SC} 는 감소하게 된다.
- ④ V_{SC} 가 $V_{MPP,min}$ 에 도달하게 되면($t=t_2$), SEMC가 전력 스위치를 'off'시키고 부하에 에너지를 공급을 차단하게 되어 V_{SC} 는 다시 증가하게 된다.
- ⑤ 이 과정은 계속 반복되고 main PV 셀은 항상 MPP 근처에서 동작하게 된다.

그림 8. MPPT 동작원리
Fig. 8 MPPT operational principles

ISC의 최대 전력전달 점인 V_{MPP} 의 예측은 다음 식에서와 같이 PV 셀의 MPP 전압과 개방회로 전압 V_{OC} 사이에 비례관계가 성립한다는 점[1]을 이용하였다.

$$V_{MPP} \cong K \cdot V_{OC} \quad (1)$$

참고문헌 [1]에 따르면 비례상수 K 는 일사량에 따라 변하지만, K 가 고정됐다고 가정해도 MPP 예측의 오차는 5%이내 임을 측정결과로 보여주었다.

본 논문에서는 작은 크기의 pilot PV 셀을 이용하여 main PV 셀의 V_{OC} 를 실시간 추적할 수 있도록 하였다. Pilot PV 셀은 main PV 셀과 같은 공정으로 같은 칩에 집적되기 때문에 같은 환경에서 같은 빛의 세기를 받게 된다. 따라서 두 PV 셀의 MPP는 일치한다고 가정할 수 있다.

본 설계에서 사용된 ISC의 K 값은 그림 3에서 보듯이 약 0.78($V_{OC}=480mV$, $V_{MPP}=375mV$)이며 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 V_{MPP} 를 기준으로 대략 $\pm 5\%$ 이내로 트래킹(tracking)할 수 있도록 저항 분주기의 저항 값을 설정하였다. 저항 분주기에 사용된 저항 값의 합은 $2M\Omega$ 으로 비교적 큰 값을 사용하였기 때문에 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 pilot PV 셀의 개방전압 V_{OC} 에 비례하는 값이 된다.

SEMC에 사용된 비교기는 그림 9에서와 같이 잡음에 대한 민감도를 낮추기 위해 히스테리시스(hysteresis) 기능을 갖는 구조로 설계하였다. 설계된 비교기는 모의실험 결과 60dB의 이득과 5mV의 히스테리시스 특성을 가지며, 1.2V의 전원에서 920nA의 전류를 소모한다. 설계된 SEMC 전체 회로의 전류 소모는 2uA이다.

그림 9. 비교기
Fig. 9 Comparator

III. 모의실험 결과

제안된 온칩 빛에너지 하베스팅 시스템은 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계되었으며, 부하 저항이 3.6k Ω 일 때 전체회로의 모의실험 결과를 그림 10에 보였다. Main PV 셀의 출력전압 V_{sc} 는 의도했던 대로 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 사이의 값을 가지며 MPP 근처에서 동작하는 것을 첫 번째 파형에서 확인할 수 있다.

두 번째 파형인 voltage booster의 출력 V_{CP} 는 SEMC가 동작하는데 필요한 1V 이상(약 1.2V)의 전압을 공급하는 것을 알 수 있다. V_{sc} 값에 따른 SEMC의 출력 enable 신호, V_{EN} 과 전력 스위치의 on/off 동작에 따라 부하에 전달되는 전압 신호인 V_{Load} 를 세 번째와 네 번째 파형에서 확인할 수 있다.

그림 10. 설계된 빛에너지 하베스터의 모의실험 결과
Fig. 10 Simulation results of the designed photo energy harvester

그림 11은 SEMC 블록을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우, 즉 MPPT 제어를 하는 경우와 하지 않는 경우에 대해 부하 저항 값을 바꿔가며 부하에 공급되는 전압을 측정한 결과이다. MPPT 제어를 적용하는 않는 경우에는 부하 저항 값에 따라 부하에 공급되는 전압의 변화가 심하지만, MPPT 제어를 적용한 경우에는 거의 일정한 전압(MPP 근처의 전압)이 부하에 공급되는 것을 알 수 있다. 따라서 부하가 큰 경우(부하 저항이 작은 경우)에도 제안된 SEMC 블록을 사용하는 경우에는 ISC(main PV 셀)가 부하에 MPP 전압을 공급하여 부하 회로를 정상동작 시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 11. MPPT 사용 여부와 R_{Load} 에 따른 부하에 공급되는 전압 비교

Fig. 11 Comparison of the load voltages versus R_{Load} as a function of MPPT control

그림 11에서 볼 수 있듯이 ISC에서 부하에 공급할 수 있는 전압은 수백 mV 정도로 작기 때문에 부하회로를 직접 구동하기에는 어려움이 있다. 따라서 부하 회로를 동작시키기 위해서는 승압회로가 필요하다. 설계된 빛에너지 하베스터의 부하에 링 발진기와 전하펌프로 구성된 승압회로를 연결하고 모의실험한 결과를 표 1과 그림 12에 보였다. MPPT 제어를 사용하지 않는 경우에는 부하단 승압회로에 공급되는 전압이 약 110mV로 링 발진기가 제대로 동작하지 않으며 전하펌프가 승압을 제대로 못하는 것을 알 수 있다. 그러나 MPPT 제어를 사용하는 경우에는 전력 스위치가 'on'되는 구간 동안 부하에 MPP 전압을 공급하기 때문에, 전하펌프가 제대로 동작하여 승압이 되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. MPPT 사용여부에 따른 부하 전하펌프 단 특성
Table. 1 Characteristics of the load charge pump as a function of MPPT control

	MPPT X	MPPT O
공급전압(V_{Load})	113mV	365mV ~ 385mV
출력전압 기울기 @ $C_L = 1mF$	59.7 μ V/ms	2.8mV/ms
클록 주파수	111kHz	12MHz
클록 스윙	2 ~ 22mV	0 ~ V_{Load}

(a)

(b)

그림 12. MPPT 사용 여부에 따른 (a) 링 발진기 출력 (b) 부하에 공급되는 전압 및 전하펌프 출력 전압
Fig. 12 (a) ring oscillator outputs (b) load voltages and charge pump outputs as a function of MPPT control

그림 13은 설계된 main PV 셀의 레이아웃이다. Main PV 셀의 면적은 8mm^2 이며, pilot PV 셀은 0.4mm^2 의 면적으로 설계하였다. 그림 14는 ISC를 제외한 빛에너지 하베스팅 회로의 전체 레이아웃으로 부하단 전하펌프 회로를 포함하여 크기는 $750\mu\text{m} \times 980\mu\text{m}$ 이다.

기존에 발표된 온칩 다이오드를 이용한 빛에너지 하베스팅 회로와 본 논문에서 설계된 회로를 표 2에 비교하였다. 표에서 보듯이 본 논문에서 처음으로 p-diff/n-well 다이오드만을 사용하여 MPPT 제어 기능을 갖는 온칩 빛에너지 하베스팅 회로를 설계하였다.

그림 13. Main PV 셀의 레이아웃
Fig. 13 Main PV cell layout

그림 14. 설계된 빛에너지 하베스팅 시스템의 레이아웃
Fig. 14 Layout of the designed photo energy harvesting system

표 2. 온칩 다이오드를 이용한 빛에너지 하베스팅 회로 비교
Table. 2 Comparison of the photo energy harvesting circuits using integrated photo diodes

	Main ISC 유형	보조 ISC 유형	에너지 변환효율	최대 출력전압	다른 회로와의 집적화	MPPT 적용여부
[6]	D_h/D_p (병렬)	없음	높음	$\sim 0.5\text{V}$	불가능	No
[7]	D_h+D_p (직렬)	없음	중간	$\sim 0.83\text{V}$	누설전류 증가	No
[5]	D_h with $D_{p,s}$	D_h with $D_{p,s}$	낮음	$\sim 0.5\text{V}$	가능	No
[11]	D_h with $D_{p,s}$	D_h+D_h (직렬)	낮음	$\sim 0.5\text{V}$	가능	Yes
This work	D_h with $D_{p,s}$	D_h with $D_{p,s}$	낮음	$\sim 0.5\text{V}$	가능	Yes

D_h : harvester diode (p-diff/n-well)
 D_p : parasitic diode (p-sub/n-well)
 $D_{p,s}$: short-circuited D_p

V. 결 론

본 논문에서는 온칩 PV 셀을 이용한 빛에너지 하베스팅 시스템을 제안하고 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계하였다. 온칩 PV 셀은 p-diff/n-well 다이오드를 이용하여 구현하였으며, 온칩 PV 셀에서 수확된 에너지를 관리하고 MPPT 제어를 위한 SEMC 회로를 설계하였다. MPPT 제어는 PV 셀의 개방전압과 MPP 전압간의 비례 관계를 이용하여, 작은 pilot PV 셀로 하여금 main PV 셀의 MPP를 실시간 트래킹할 수 있도록 설계하였다. 설계된 회로를 모의실험한 결과 MPPT 제어를 사용하는 경우, 제안된 회로는 부하가 큰 경우에도 부하에 MPP 근처의 일정한 전압을 공급하여 부하 회로를 정상 동작시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 설계된 온칩 빛에너지 하베스팅 시스템은 저비용으로 작은 크기로 구현가능하기 때문에 duty cycle이 비교적 낮은 environmental monitoring 분야의 자가발전 센서노드에 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] D. Dondi, A. Bertacchini, L. Larcher, P. Pavan, D. Brunelli, and L. Benini, "A solar energy harvesting circuit for low power applications," *IEEE ICSET*, pp. 945-949, 2008.
- [2] J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13 μ m Low-Voltage Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, and R. P. Mertens, "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 μ A Controller," *IEEE JSSC*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [4] H. Shao, C. Tsui, and W. Ki, "The Design of a Micro Power Management System for Applications Using Photovoltaic Cells With the Maximum Output Power Control," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, vol.17, no.8, pp. 1138-1142, 2009.
- [5] M. Ferri, D. Pinna, E. Dallago, and P. Malcovati, "Integrated micro-solar cell structures for harvesting supplied microsystems in 0.35- μ m CMOS technology," *ICSENS*, pp. 542-545, 2009.
- [6] N. J. Guilar, T. J. Kleeburg, A. Chen, D. R. Yankelevich, and R. Amirtharajah, "Integrated Solar Energy Harvesting and Storage," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, vol.17, no.5, pp. 627-637, 2009.
- [7] Y. Arima and M. Ehara, "On-chip solar battery structure for CMOS LSI," *IEICE Electronics Express*, vol.3, no.13, pp. 287-291, 2006.
- [8] C. Hua et al., "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, pp. 99-107, Feb. 1998.
- [9] W. Wu et al., "DSP-Based multiple peak power tracking for expandable power system," in *Proc. Applied Power Electronics Conf. and Exposition 2003*, vol. 1, pp. 525-530, 2003.
- [10] C. Hua and C. Shen, "Control of DC/DC converters for solar energy system with maximum power tracking", *23rd IECON*, vol.2, pp. 827-832, 1997.
- [11] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system", *35th IEEE PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.

저자소개

윤은정(Eun-jung Yoon)

2011.2 : 인천대학교 전자공학과
학사

2011.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※관심분야: 에너지 하베스팅 회로 설계

황인호(In-ho Hwang)

2011.2 : 인천대학교 전자공학과
학사

2011.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계

박준호(Jun-ho Park)

2010.2 : 인천대학교 전자공학과
학사

2010.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계

박종태(Jong-tae Park)

1981.2 : 경북대학교 전자공학과
학사

1983.8 : 연세대학교 전자공학과
석사

1987.2 : 연세대학교 전자공학과 박사

1983.8~1985.8 : 금성반도체(주) 연구소 연구원

1991.1~1991.12 : MIT Post Doc.

2000.7~2001.8 : UC Davis 방문교수

1987.3~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : CMOS Reliability, Nano-scale CMOS,
SOI/MOSFET, RF-CMOS

유종근(Chong-gun Yu)

1985.2 : 연세대학교 전자공학과
학사

1987.2 : 연세대학교 전자공학과
석사

1993.12 : Iowa State University 전기 및 컴퓨터공학과
Ph.D.

2009.8~2010.7 : UC Davis 방문교수

1994.3~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계,
RFIC 설계