

논문 2011-48SC-2-3

온칩 태양 에너지 하베스팅을 위한 에너지 관리 시스템 설계

(Design of an Energy Management System for On-Chip Solar Energy Harvesting)

진 지 호*, 이 덕 환*, 박 준 호*, 박 종 태**, 유 중 근***

(Ji-Ho Jeon, Duck-Hwan Lee, Joon-Ho Park, Jong-Tae Park, and Chong-Gun Yu)

요 약

본 논문에서는 0.35 μ m CMOS 공정을 이용하여 태양 에너지 하베스팅을 위한 에너지 관리 시스템을 설계하였다. 태양 에너지 관리 시스템은 ISC(Integrated Solar Cell), voltage booster, MPPT(Maximum Power Point Tracker) control unit으로 구성된다. ISC의 개방전압은 약 0.5V이고, 단락 전류는 약 15 μ A이다. Voltage booster는 뒷단에 약 1.5V로 승압된 전압을 공급한다. MPPT control unit은 ISC가 MPP점에 도달 하였을 때, load로 전력이 전달될 수 있도록 pMOS 스위치를 동작시킨다. SEMU(Solar Energy Management Unit)의 크기는 패드를 포함하여 360 μ m \times 490 μ m이다. ISC의 면적은 500 μ m \times 2000 μ m이다. 제작된 칩을 측정된 결과 설계된 SEMU가 ISC에서 수확된 에너지에 대해 MPPT control 동작을 제대로 수행하는 것을 확인하였다. 측정된 MPP 전압범위는 약 370mV~420mV이다.

Abstract

In this paper, an energy management circuit for solar energy harvesting system is designed in 0.35 μ m CMOS technology. The solar energy management system consists of an ISC(Integrated Solar Cell), a voltage booster, and an MPPT(Maximum Power Point Tracker) control unit. The ISC generates an open circuit voltage of 0.5V and a short circuit current of 15 μ A. The voltage booster provides the following circuit with a supply voltage about 1.5V. The MPPT control unit turns on the pMOS switch to provide the load with power while the ISC operates at MPP. The SEMU(Solar Energy Management Unit) area is 360 μ m \times 490 μ m including pads. The ISC area is 500 μ m \times 2000 μ m. Experimental results show that the designed SEMU performs proper MPPT control for solar energy harvested from the ISC. The measured MPP voltage range is about 370mV~420mV.

Keywords : Energy Harvesting, Solar Energy, Integrated Solar Cell, MPPT, Charge Pump

I. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈이나 환경문제, 원자력 발전소 및 핵폐기물 처리장 건설에 대한 지역 주민 반대 등

의 문제로 인하여 신·재생 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 국제 유가가 여러 가지 요인으로 예측이 곤란할 뿐만 아니라 향후 화석연료 고갈에 대비한 에너지원의 다변화가 절실히 필요한 실정이다. 또한, 국제기후협약 등 국제적인 환경 규제에 대처하기 위한 핵심 기술로 친환경적인 태양광 발전의 중요성이 점차 증가하고 있으며, 이미 일본, 독일 등의 선진국들의 집중적인 확대 보급 정책에 힘입어 태양전지 시장이 매우 빠르게 성장하고 있다.

현재 연구되고 있는 태양전지는 크게 나누어 실리콘 태양전지, 화합물 태양전지, 유기 및 염료 감응형 태양전지 등이 있으며, 이들 중 실리콘 태양전지가 기존의

* 학생회원, ** 평생회원, *** 평생회원-교신저자,
인천대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, University of Incheon)

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

접수일자: 2010년10월22일, 수정완료일: 2011년3월8일

상용전력과 경쟁력을 갖기 위한 저가 고효율화의 요구에 가장 부합하고 있고 세계적으로 대체 에너지 연구의 선도적 역할을 하고 있는 연구 그룹에서도 이 목표를 달성하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구를 기반으로 한 기존의 태양 에너지 하베스팅 시스템은 빛 에너지를 주로 패널 형태인 solar cell을 통해 회로 외부로부터 전원을 공급하는 구조를 보이고 있다.^[6] 패널 형태의 solar cell은 효율이 높다는 장점은 있으나, 가격이 비싸고, 다른 회로와의 집적화가 어렵기 때문에 초소형 센서노드에의 적용에 단점을 갖는다.

본 논문에서는 초소형 센서노드를 대상으로 하기 때문에 가능한 에너지 변환 소자의 크기를 최소화 할 필요가 있다. 따라서 빛 에너지 변환소자는 CMOS 공정의 photodiode를 이용하여 integrated solar cell (이하 ISC) 형태로 구현함으로써 다른 회로(에너지 전력관리 회로, 센서 노드 회로)와 작게 집적화 하고자 한다. 기존에 에너지 변환 소자들로부터 효율적인 에너지 수확을 위한 MPPT(Maximum Power Pont Tracker) control은 주로 마이크로프로세서나 DSP(Digital Signal Processing) 방식 등이 주로 이용되어 왔다.^[3] 마이크로프로세서나 DSP 방식은 전력소모가 많고 큰 면적을 차지하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 전력소모를 줄이기 위해 간단한 방식의 MPPT 컨트롤을 구현하였다. 본 논문은 II장 회로설계 내용, III장 모의실험 결과, IV장 IC 제작 및 측정 결과 V장 결론 순으로 구성되어 있다.

II. 회로 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT control unit을 포함한 태양 에너지 하베스팅 시스템의 블록도이다. 회로의 구성은 태양 에너지 수확을 위한 ISC와 수확된 에너지 관리를 위한 voltage booster(charge pump type), MPPT control unit 등으로 구성되어 있다. ISC에서 나오는 출력 전압은 최대 0.5V정도이다. 만약 다른 회로들과 집적화가 되지 않는다면 직렬 연결하여 높은 전압을 얻을 수 있지만, 다른 회로들과 함께 같은 기판(substrate)에 집적되기 때문에 현실적으로 직렬연결이 불가능하다.^[1] ISC 출력 전압의 최대값인 0.5V로는 부하단 회로를 구동시키기엔 어려움이 있으므로 voltage booster를 통하여 ISC의 출력 전압을 증폭시킬 필요가 있다. MPPT control unit은 voltage booster의

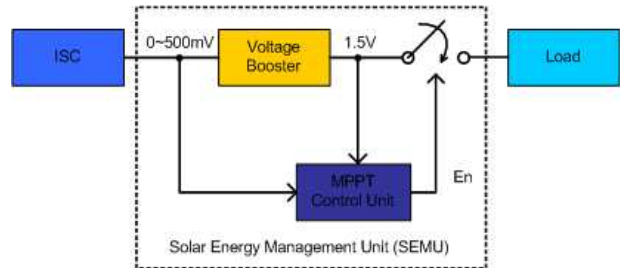


그림 1. 제안된 태양에너지 하베스팅 시스템 블록도
Fig. 1. Proposed solar energy harvesting system.

출력전력이 최대가 되었을 때, 뒷단의 회로로 전력을 공급하는 역할을 한다.

1. Integrated Solar Cell (ISC)

참고문헌^[2]에서 1mm²의 solar cell에서 12.3μA의 전류가 생성 된다고 보고되었다. 본 논문에서 설계된 solar cell의 면적이 500μm×2000μm(약 1mm²)이므로 생성 전류를 약 15μA로 가정하였다. ISC의 구조는 그림 2와 같이 finger 형태로 설계를 하였고, P-diffusion finger의 length는 20μm, 간격도 20μm로 설계하였다.

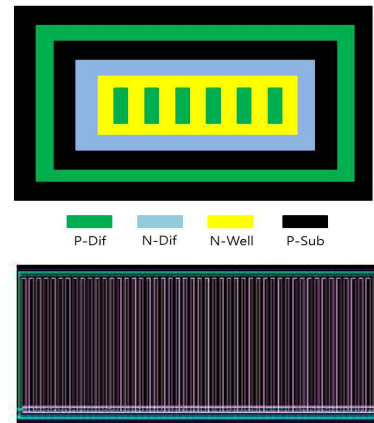


그림 2. ISC 레이아웃
Fig. 2. ISC layout.

2. Voltage Booster

Voltage booster 회로의 형태는 4-stage charge pump를 사용했으며, 이에 필요한 클록은 ring oscillator를 통하여 공급하였다.

가. Ring Oscillator

그림 3은 설계된 ring oscillator의 회로도이다. Ring oscillator의 특성상 2번째 인버터 출력과 3번째 인버터의 출력이 non-overlapping 되지 않기 때문에 그림 3과

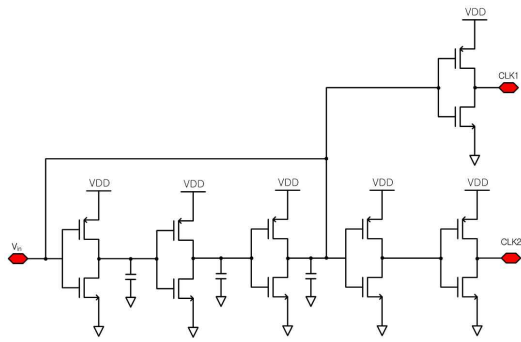


그림 3. 제안된 ring oscillator
Fig. 3. Proposed ring oscillator.

같이 3번째 단 뒤에 인버터를 추가하여 ring oscillator의 발진 출력을 개선하였다. 그리고 인버터 사이에 capacitor(1pF)를 연결하여 두 출력의 발진 주파수와 duty cycle을 조절하였다.

나. Charge Pump

그림 4는 설계한 4단 charge pump의 회로도이다. MOSFET을 다이오드 형태로 연결시켜 회로를 구현하였기 때문에 MOS 자체에서 V_t 만큼의 전압 강하가 생기게 된다. 사용된 capacitor의 크기는 3pF이다.

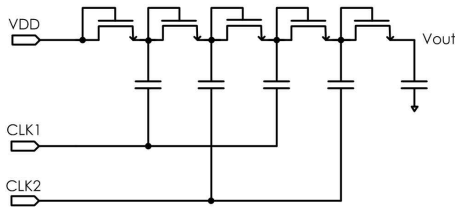


그림 4. 차지 펌프
Fig. 4. Charge Pump.

3. Maximum Power Point Tracker(MPPT) Control Unit

그림 5의 태양 에너지 하베스팅 시스템에서 점선 부분인 MPPT control unit이다.

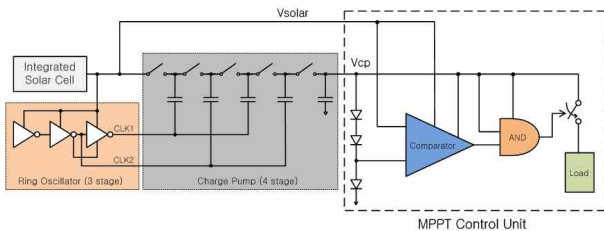


그림 5. MPPT control unit 블록 다이어그램
Fig. 5. Block diagram of MPPT control unit.

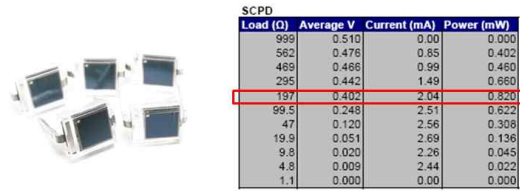


그림 6. 상용 solar cell (SCPD)
Fig. 6. Commercial solar cell (SCPD).

기존 연구에서는 마이크로 프로세서나 DSP를 이용하여 MPPT control unit을 구현하였다.^[3] 그러나 이런 경우 전력소비가 매우 커서 본 마이크로 에너지 하베스팅을 이용한 센서노드 응용에는 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 간단한 구조로 MPPT control unit을 설계하여 전력소비를 최소화 시켰다. 본 논문에서 설계한 MPPT control unit의 구성은 comparator, AND gate, 스위치 등으로 구성되어 있다. MPPT control unit은 ISC의 출력 전압이 그림 6과 같은 상용 solar cell (SCPD)^[4]의 MPP 범위(350mV와 420mV사이) 일 때 동작하도록 설계하였다.

다이오드는 voltage booster의 출력을 ISC의 maximum power point까지 drop시켜 비교기의 기준 전압을 생성하는 역할을 하며, 전류 소모를 줄이기 위하여 MOSFET을 사용하였다. AND gate는 비교기의 출력 파형을 명확하게 구분하고, 그 출력은 pMOS 스위치의 on/off를 결정하게 된다.

가. Comparator

그림 7은 설계된 comparator의 회로도이다. Comparator는 ISC의 출력 전압과 diode를 통해 MPP 정도로 전압 강하된 charge pump의 출력전압을 비교하여 pMOS 스위치의 on/off를 결정하는 역할을 한다.

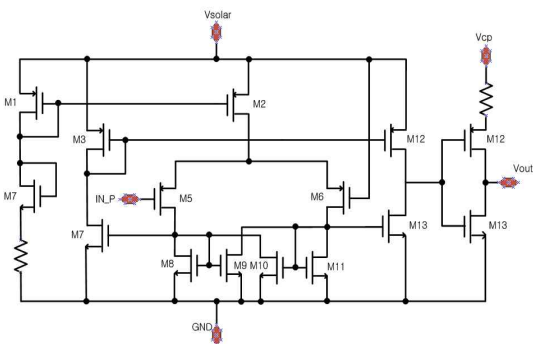


그림 7. 비대칭 인버터를 포함한 비교기
Fig. 7. Comparator with unbalanced inverter.

Comparator 출력단에 추가 된 비대칭 인버터는 비교기 출력을 solar cell의 동작점에 맞춰 신호를 내보내고 비교기 출력의 high 레벨을 charge pump의 출력 범위까지 스윙하도록 하는 역할도 한다. 그리고 comparator의 전력소모를 줄이기 위해 모든 MOS는 sub-threshold 영역에서 동작하도록 설계하였다.

III. 모의실험 결과

그림 8은 ring oscillator의 VDD를 변화시키며 그에 따른 발진 주파수의 변화를 모의실험으로 확인한 결과이다. 모의실험 결과 0.2V까지는 발진을 하지 않았고 0.3V에서 30Hz, 0.4V에서 300Hz, 0.5V에서 3.5kHz로 0.1V 증가할 때 마다 약 10배씩 발진 주파수가 증가하는 것을 확인하였다.

그림 9는 charge pump의 모의실험 결과이다. 모의실험 결과 ISC의 출력전압이 약 0.5V일 때, charge pump의 출력은 약 1.6V까지 상승한다.

그림 10은 MPPT control unit의 모의 실험 결과이다. A는 charge pump의 출력전압을 테스트로 입력한

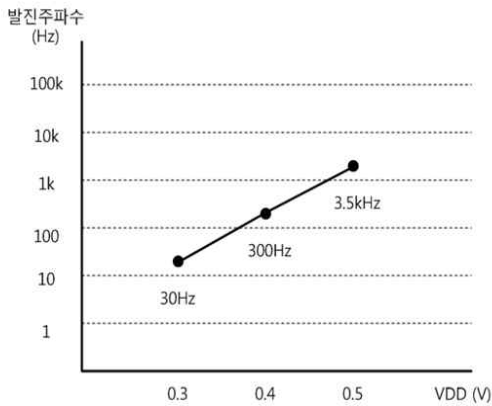


그림 8. VDD 변화에 따른 발진 주파수 변화
Fig. 8. Oscillation frequency versus VDD.

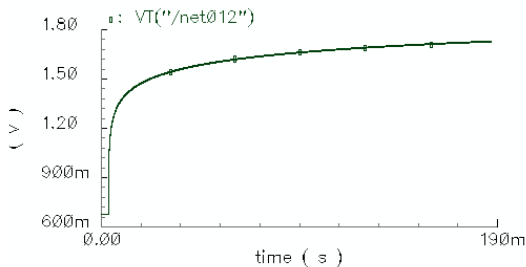


그림 9. 차지 펌프 출력 전압
Fig. 9. Charge pump output voltage.

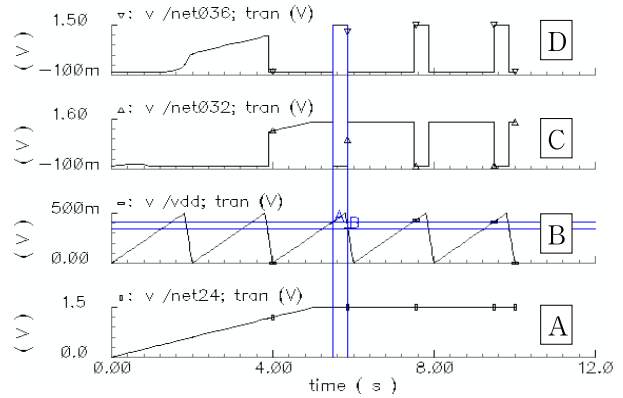


그림 10. MPPT control unit 전체 모의실험 결과
Fig. 10. Simulation results of MPPT control unit.

파형이고 B는 ISC의 출력전압을 가정한 테스트 입력 파형이다. C는 AND gate 출력으로 pMOS 스위치를 on/off 시키는 역할을 하며 이 신호를 받고 load에 걸리는 전압이 D파형이다. 모의실험 결과 ISC의 전압이 약 413mV가 되었을 때 pMOS의 스위치를 on시켜 load로 power를 전달하기 시작하며, ISC 전압이 약 340mV가 되었을 때 off시켜 power 전달을 방지한다.

IV. IC 제작 및 측정 결과

1. IC 제작

설계된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 제작되었다. 그림 11은 MPPT control unit을 포함한 태양 에너지 하베스팅 시스템의 레이아웃 및 칩 사진이다. SEMU의 크기는 PAD를 포함하여 360 μ m \times 490 μ m이며, ISC의 면적은 2000 μ m \times 500 μ m이다.

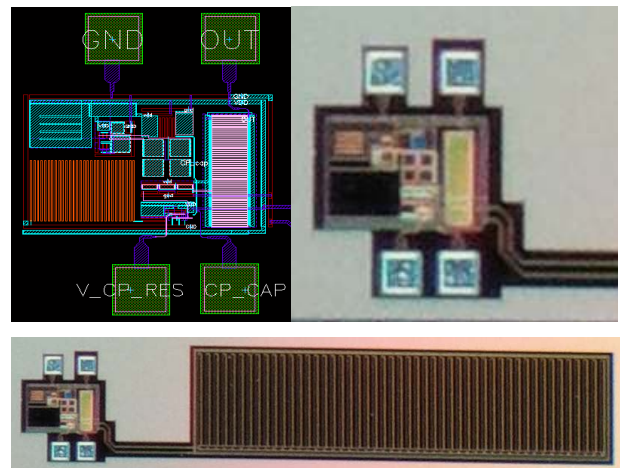


그림 11. 레이아웃 및 칩 사진
Fig. 11. Layout and chip photograph.

2. 측정 결과

그림 12는 MPPT control unit을 포함한 태양 에너지 하베스팅 시스템의 성능을 측정하기 위해 제작한 PCB와 측정 환경 모습이다.

그림 13은 제작된 ISC에 빛을 비추었다가 끄는 동작을 수행하면서 charge pump의 출력을 측정한 파형이고, 표 1에 그 결과를 요약하였다. Charge pump의 chip 테스트는 출력단 커패시터(C_L)의 용량을 $3.3\mu F$ 으로 고정시키고 부하저항(R_L)을 변화시키면서 승압되는 전압과 rising time, falling time을 측정하였다. 이 때 인공 태양 전구 조도의 최대치는 약 20klux이다. 이 조도는 일상생활에서 구름 낀 맑은 날 정도에 해당되는 조도이다.



그림 12. 테스트보드 및 측정환경
Fig. 12. Test board and measurement setup.

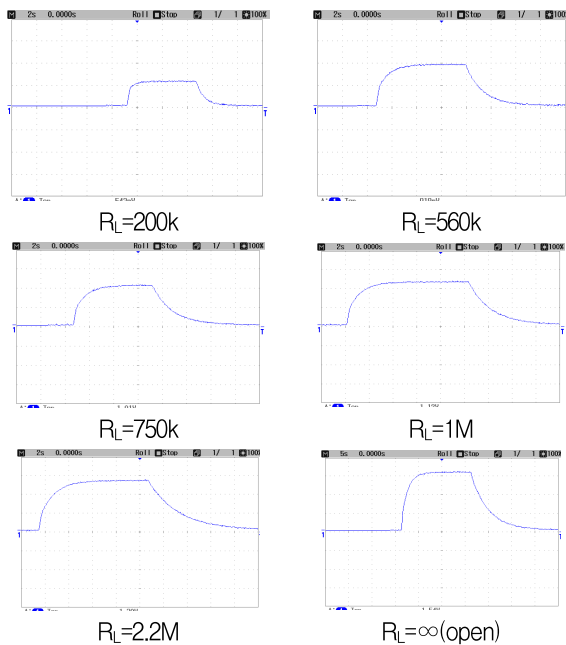


그림 13. 차지 펌프 측정 결과
Fig. 13. Measured output of charge pump($C_L=3.3\mu F$).

그림 14, 15, 16은 MPPT control unit을 포함한 시스템의 전체 chip test 결과이다. 그림 14는 ISC 대신 함수발생기로 입력을 인가하였을 때 측정한 결과이다. 함수발생기에서 인가된 파형은 100Hz의 삼각파이다. 그림 15는 상용 solar cell을 사용하여 측정한 결과이다. 사용한 상용 solar cell의 모델명은 Monocrystalline solar cell^[5]이고 최대 전압은 3.4V, 최대 전류는 12mA이다. 마지막으로 그림 16은 실제 집적화한 ISC를 이용한 측정 결과이다. 세 경우 모두 charge pump의 출력 전압

표 1. Charge pump 측정 결과 ($C_L=3.3\mu F/0\sim 20klux$)
Table 1. Charge pump test result ($C_L=3.3\mu F/0\sim 20klux$).

R_L	승압 전압	Rising Time	Falling Time
200k	543mV	592ms	1.346s
560k	918mV	1.640s	3.160s
750k	1.01V	1.648s	3.640s
1M	1.12V	1.912s	4.200s
2.2M	1.3V	2.280s	5.680s
∞ (open)	1.54V	2.825s	8.500s

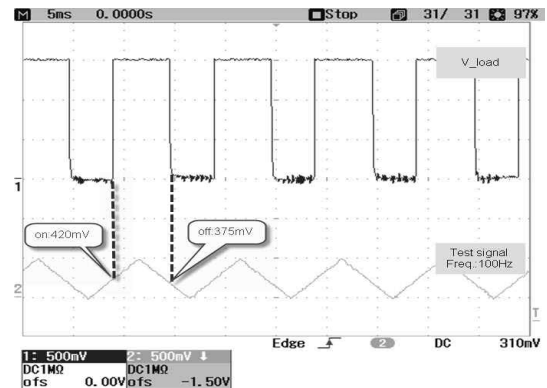


그림 14. 전체 칩 측정 결과 (테스트 신호)
Fig. 14. Measured result of total chip (Test signal).

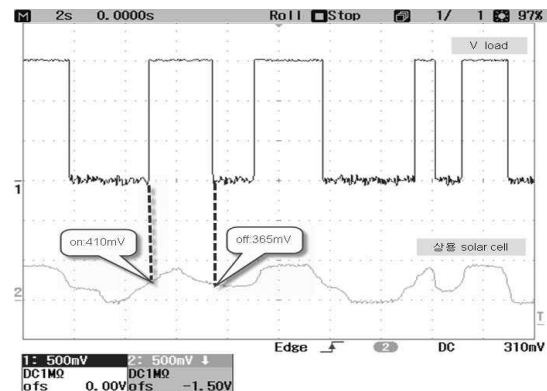


그림 15. 전체 칩 측정 결과 (상용 solar cell)
Fig. 15. Measured result of total chip.
(Commercial solar cell)

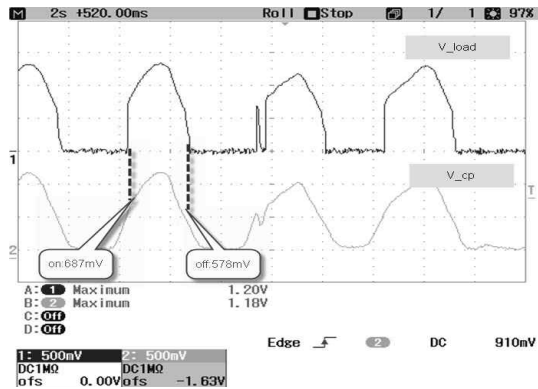


그림 16. 전체 칩 측정 결과 (ISC)

Fig. 16. Measured result of total chip (ISC).

표 2. MPP 측정 결과 ($C_L=3.3\mu F/R_L=10M\Omega$)

Table 2. MPP test results ($C_L=3.3\mu F/R_L=10M\Omega$).

Solar cell 유형	MPPT control unit 동작 범위 (스위치 on 전압 ~ off 전압)
함수발생기	420mV ~ 375mV
상용 Solar cell	410mV ~ 365mV
제작된 ISC	687mV ~ 578mV (Charge pump 전압)

이 충전되는 커패시터(CL)의 용량은 $3.3\mu F$ 이며, 부하저항(R_L)은 모두 $10M\Omega$ 이다.

모의실험에서 MPPT control unit이 동작하는 범위는 340mV에서 413mV이었다. Chip test 결과, MPPT 범위는 함수발생기로 입력 파형을 인가한 경우 375mV에서 420mV이었고, 상용 solar cell로 측정을 한 경우에는 365mV에서 410mV이었다. 마지막으로 ISC를 사용한 경우는 charge pump의 출력 전압이 578mV에서 687mV일 때 동작을 하였다. 표 2에 측정결과를 요약하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근 각광받고 있는 태양광을 이용하여 무선 네트워크 시스템의 센서 노드에 에너지를 공급할 수 있는 에너지 관리 시스템을 설계하였다. 기존 태양전지는 패널 형태들이 많았는데, 본 연구에서는 CMOS $0.35\mu m$ 공정을 이용하여 회로와 함께 집적화를 하였다. 이로 인해 면적을 크게 감소시킬 수 있었고, 외부에 따로 태양전지를 장착하지 않아도 되는 이점을 가져 왔다. 배터리 없이 회로를 구동시킬 수 있기 때문에 산간·도서 지방이나 사람의 출입이 어려운 곳에서도 사

용이 용이하도록 하였다.

ISC에서 생성된 전압은 약 0.5V이고 이 전압은 charge pump 형태의 voltage booster를 거쳐 약 1.6V까지 승압된다. MPPT control unit은 voltage booster의 출력을 ISC의 MPP 범위 내에서 뒷단 회로에 전력을 공급하는 역할을 한다. 목표 또한 ISC의 MPP 범위는 약 350mV에서 420mV이고, 시뮬레이션 결과 340mV와 413mV사이에서 MPPT control unit이 동작하는 것을 확인하였다. 설계한 시스템을 칩으로 제작하여 측정할 결과 테스트 파형을 solar cell 출력전압으로 가정하여 인가한 경우 스위치의 off 지점은 약 7.1%, on 지점은 약 1.7%의 오차를 보였고, 상용 solar cell로 측정을 한 경우 off 지점은 약 4.3%, on 지점은 약 0.7%의 오차를 보였다. 이 MPP 범위는 실제 solar cell의 MPP 범위가 변하여도 외부의 저항 소자로 chip 외부에서 조절이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Arima and M. Ehara, "On-chip solar battery structure for CMOS LSI," IEICE Electronics Express, vol.3, no.13, pp. 287-291, 2006.
- [2] M. Ferri, D. Pinna, E. Dallago, and P. Malcovati, "A $0.35\mu m$ CMOS Solar energy scavenger with power storage management system," IEEE RME, pp. 88-91, 2009.
- [3] 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.
- [4] http://www.solarbotics.com/assets/datasheets/solarbotics_solarcell_datasheet.pdf.
- [5] http://www.solarbotics.com/assets/datasheets/scc2422-2009_tests.pdf
- [6] 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.
- [7] 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.

저 자 소 개



전 지 호(학생회원)
 2009년 인천대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2011년 인천대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2011년~현재 C&S Technology
 연구원.

<주관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC
 설계, 에너지 하베스팅 회로 설계>



박 증 태(평생회원)
 1981년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1983년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1987년 연세대학교 전자공학과
 박사 졸업.

1991년 1월~1991년 12월 MIT Port Doc.
 2000년 7월~2001년 8월 UC Davis 방문교수
 1987년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : CMOS Reliability, Nano-scale
 CMOS, SOI/MOSFET, RF-CMOS



이 덕 환(학생회원)
 2009년 인천대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2011년 인천대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2011년~현재 C&S Technolog
 연구원.

<주관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC
 설계, 에너지 하베스팅 회로 설계>



유 종 근(평생회원)
 1985년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1993년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1993년 Iowa State University
 전기 및 컴퓨터공학과
 박사 졸업.

1989년 9월~1991년 8월 Texas A&M
 University 전기공학과 연구조교
 2009년 8월~2010년 7월 UC Davis 방문교수
 1994년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC
 설계, RFIC 설계>



박 준 호(학생회원)
 2010년 인천대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2010년~현재 인천대학교
 전자공학과 석사과정.

<주관심분야 : CMOS Analog/
 Mixed-mode IC 설계, 에너지 하
 베스팅 회로 설계>