

링발진기를 이용한 CMOS 온도센서 설계

최진호*

Design of CMOS Temperature Sensor Using Ring Oscillator

Jin-Ho Choi*

Department of Embedded Software Engineering, Busan University of Foreign Studies, Busan 609-780, Korea

요 약

링 발진기를 이용한 온도센서를 공급전압 1.5volts를 사용하여 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 공정으로 설계하였다. 온도센서는 온도가 변화하더라도 일정한 출력주파수를 가지는 링 발진기와 온도가 증가하면 출력주파수가 감소하는 링 발진기를 이용하여 설계하였다. 온도를 디지털 값으로 변환하기 위해 온도에 무관한 링 발진기의 출력 신호는 카운터의 클럭 신호로 사용하였으며, 온도에 따라 변화하는 링 발진기의 출력신호는 카운터의 인에이블 신호로 사용하였다. 설계된 회로의 HPICE 시뮬레이션 결과 회로의 동작온도가 -20°C에서 70°C까지 변화할 때 온도 에러는 -0.7°C에서 1.0°C 이내였다.

ABSTRACT

The temperature sensor using ring oscillator is designed by $0.18\mu\text{m}$ CMOS process and the supply voltage is 1.5volts. The temperature sensor is designed by using temperature-independent and temperature-dependent ring oscillators and the output frequency of temperature-independent ring oscillator is constant with temperature and the output frequency of temperature-dependent ring oscillator decreases with increasing temperature. To convert the temperature to a digital value the output signal of temperature-independent ring oscillator is used for the clock signal and the output signal of temperature-dependent ring oscillator is used for the enable signal of counter. From HSPICE simulation results, the temperature error is less than from -0.7°C to 1.0°C when the operating temperature is varied from -20°C to 70°C.

키워드 : 온도센서, 링 발진기, 시간-디지털 변환기, 주파수-디지털 변환기

Key word : temperature sensor, ring oscillator, time-to-digital converter, frequency-to-digital converter

Received 07 May 2015, Revised 28 May 2015, Accepted 16 June 2015

* Corresponding Author Jin-Ho Choi(E-mail:jhchoi@pusf.ac.kr , Tel+82-51-509-6242)

Department of Embedded Software Engineering, Busan University of Foreign Studies, Busan 609-780, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.9.2081>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

MOS 트랜지스터로 제작된 전자 부품의 경우 동작 온도가 증가하면 문턱전압이 감소하고, 캐리어의 이동도가 감소하여 전기적인 특성이 저하된다. 그러므로 정확도를 요구하는 측정시스템이나 전자시스템의 경우 전자 부품 내의 정확한 온도를 측정하기 위해서는 반도체 온도센서가 필요하다. 그리고 반도체 온도센서는 독립적인 부품으로도 다양한 영역에서 응용된다[1-7].

일반적으로 반도체 공정을 이용한 온도센서의 구조는 3가지 형태로 연구되고 있다. 먼저, 그림 1과 같이 온도에 따라 전압 혹은 전류가 변화하는 회로와 온도에 무관한 밴드갭 기준회로를 구성하여, 두 회로의 출력값 차를 구한다. 이 값은 온도에 관한 정보를 가지고 있으며, 신호처리를 위해 아날로그-디지털 변환기를 사용하여 디지털 값으로 변환한다[1-3].

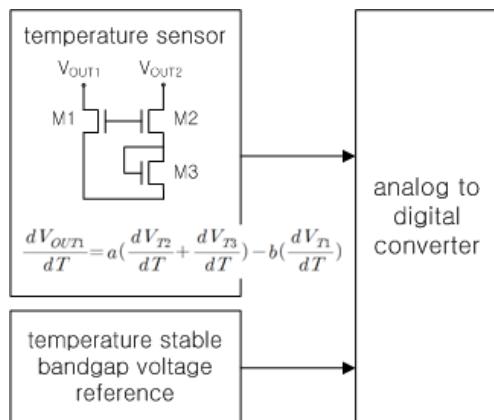


그림 1. 아날로그-디지털 변환기를 사용하는 온도센서
Fig. 1 Temperature sensor using analog-digital converter

그림 1의 경우 온도에 따른 출력전압 혹은 출력전류를 디지털 값으로 변환할 때 충분한 분해능을 가지도록 하기 위해서는 아날로그-디지털 변환기의 비트를 증가시켜야 한다. 이로 인해 칩 면적이 증가하는 단점이 있다[1-3]. 두 번째 방법으로는 그림 2와 같은 구조이다. 그림 2(a)의 경우 온도에 따라 지연시간이 서로 다른 회로를 이용하여 온도 변화를 시간 정보로 변환한다. 변환된 시간 정보를 시간-디지털 변환기를 이용하여 온도에 비례하는 디지털 값으로 변환한다[4,5].

그림 2(b)는 온도에 따라 출력주파수를 변화시켜 온도를 주파수 정보로 변환한다. 변환된 주파수 정보를 주파수-디지털 변환기를 사용하여 디지털 값으로 변환하면 온도에 비례하는 디지털 값을 얻을 수 있다[6,7].

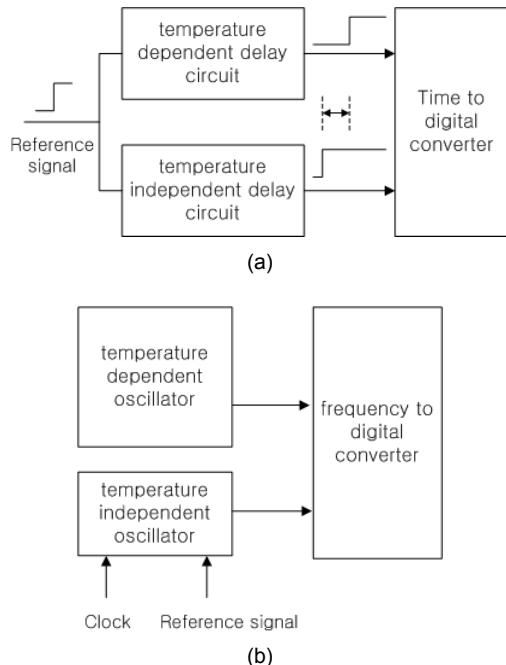


그림 2. 온도에 따른 펄스폭 변조와 주파수 변조를 이용하는 온도센서 (a) 펄스폭 변조와 시간-디지털 변환기를 사용하는 온도센서 (b) 주파수 변조와 주파수-디지털 변환기를 사용하는 온도센서

Fig. 2 Temperature sensor using pulse width modulation and frequency modulation with temperature (a) temperature sensor using pulse width modulation and time-to-digital converter (b) temperature sensor using frequency modulation and frequency-to-digital converter

그림 2의 경우 그림 1의 회로와는 달리 외부에서 클럭 신호나 기준 신호를 인가하여야 하는 단점이 있다[4-7]. 그러나 그림 1에서 사용되는 아날로그-디지털 변환기를 사용하지 않으므로 칩 면적을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 온도에 따라 주파수 신호를 생성하고, 주파수-디지털 변환 방법으로 온도센서를 설계하고자 한다. 그러나 기존의 방법과는 달리 외부에서 인가되는 신호 없이 온도센서를 구성하고자 한다.

II. 본 론

그림 3은 본 논문에서 제안한 온도센서의 개략도이다. 바이어스 회로의 출력 전류는 온도에 따라 증가하도록 설계하였다. 온도에 따라 증가된 바이어스 전류는 링 발진기 I에 공급된다. 바이어스 전류가 증가함에 따라 링 발진기 I의 출력주파수는 온도에 따라 감소하는 것을 보상하여 온도변화에 민감하지 않은 출력 주파수를 생성한다. 그리고 링 발진기 II는 온도에 따른 보상을 하지 않아 온도가 증가하면, 링 발진기 출력신호의 주기가 증가한다. 링 발진기 I과 링 발진기 II의 출력신호를 카운터의 클럭 단자와 인에이블 단자에 각각 연결하여, 링 발진기 II의 신호가 high인 동안 링 발진기 I의 신호를 카운터가 헤아리도록 구성하였다. 즉, 온도가 증가하면 카운터 인에이블 시간은 증가하게 되고 이로 인해 카운터의 디지털 출력 값은 증가한다.

2.1. 바이어스회로

그림 4는 링 발진기 I에 공급할 전류를 생성하는 바이어스 회로로서 온도가 증가하면 출력 전류가 증가하도록 설계하였다. 그림 4에서 트랜지스터 MN1과 MN2는 weak inversion 영역에서 동작한다. 드레인-소스 전압과 열전압 V_T 사이에서 $V_{DS} \gg V_T$ 라고 가정하면, 전류 I_{REF} 와 I_{OUT} 은 식(1) 및 식(2)와 같다[6].

$$I_{REF} \simeq \mu_o C_{OX} \frac{W_{MN1}}{L_{MN1}} (V_T)^2 e^{(V_{GS1} - V_{TH})/V_T} \quad (1)$$

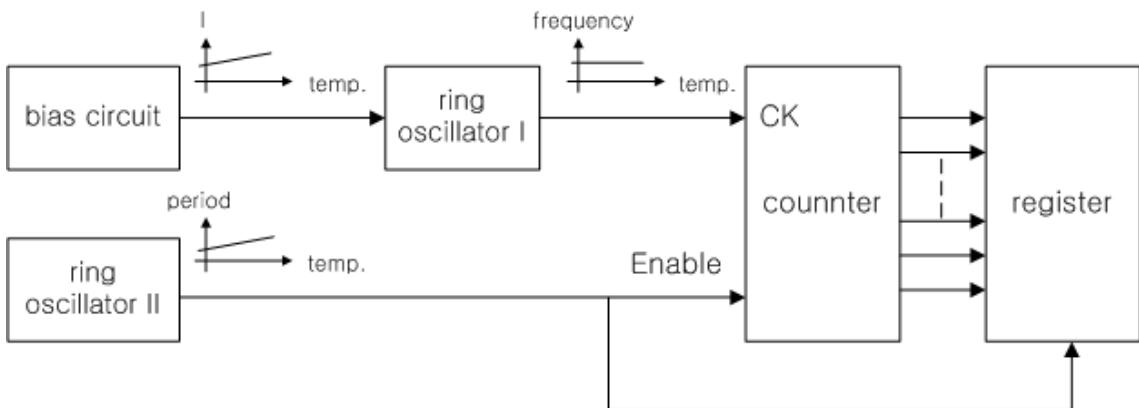


그림 3. 제안된 온도센서의 개략도

Fig. 3 Block diagram of proposed temperature sensor

$$I_{OUT} \simeq \mu_o C_{OX} \frac{W_{MN2}}{L_{MN2}} (V_T)^2 e^{(V_{GS2} - V_{TH})/V_T} \quad (2)$$

여기서 V_{TH} 는 문턱전압이며, V_{GS1} 과 V_{GS2} 는 트랜지스터 MN1과 MN2의 게이트-소스 전압이다. 트랜지스터 MP1과 MP2는 전류미러이므로 식(3)이 성립한다.

$$\frac{I_{REF}}{I_{OUT}} = \frac{W_{MP1}/L_{MP1}}{W_{MP2}/L_{MP2}} \quad (3)$$

식(1) 및 식(2)를 V_{GS1} 과 V_{GS2} 에 대해 정리하면 식(4) 및 식(5)와 같다.

$$V_{GS1} = V_T \times \ln(I_{REF}/I_{N1}) + V_{TH} \quad (4)$$

$$V_{GS2} = V_T \times \ln(I_{OUT}/I_{N2}) + V_{TH} \quad (5)$$

여기서 I_{N1} 과 I_{N2} 는 각각 $\mu_o C_{OX} (W_{MN1}/L_{MN1})(V_T)^2$ 과 $\mu_o C_{OX} (W_{MN2}/L_{MN2})(V_T)^2$ 이다. 트랜지스터 MP1, MP2, MN1과 MN2의 채널 길이가 모두 동일하다고 가정하고, 식(3), 식(4) 및 식(5)를 식(6)에 대입하여 정리하면 출력전류 I_{OUT} 은 식(7)과 같다[6].

$$I_{OUT} = \frac{V_{GS1} - V_{GS2}}{R1} \quad (6)$$

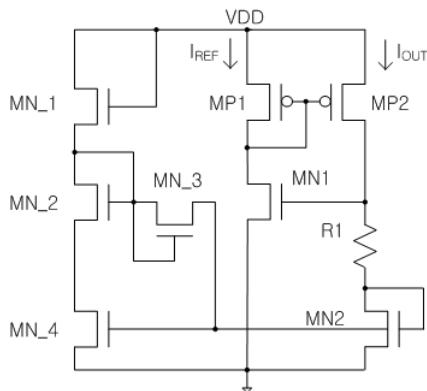


그림 4. 바이어스 회로
Fig. 4 Bias circuit

$$I_{OUT} = \frac{V_T}{R1} \times \ln \left(\frac{W_{MP1} W_{MN2}}{W_{MP2} W_{MN1}} \right) \quad (7)$$

식 (7)로부터 저항 R1과 채널 폭의 비를 조절하면 온도에 따라 원하는 기울기를 가지는 출력전류를 구할 수 있다. 그림 5는 바이어스 회로를 온도에 따라 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 결과 온도가 10°C 증가할 때 바이어스 전류는 약 0.085μA 증가하였다.

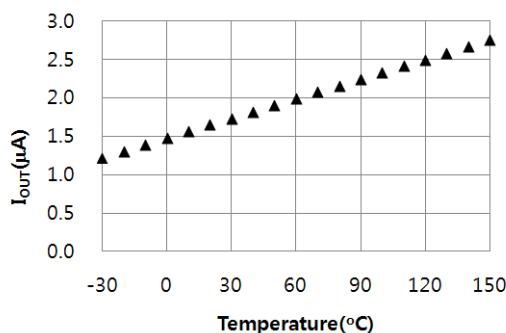


그림 5. 온도에 따른 바이어스 회로의 출력 전류
Fig. 5 Output current of bias circuit with temperature

2.2. 동작온도에 안정된 링 발진기

설계된 바이어스 회로를 이용하여 온도가 증가함에 따라 링 발진기의 공급 전류를 증가시켜, 온도에 민감하지 않은 링 발진기를 그림 6과 같이 구성하였다. 그림 7은 온도 변화에 안정된 그림 6의 링 발진기를 온도에 따라 시뮬레이션한 결과이다.

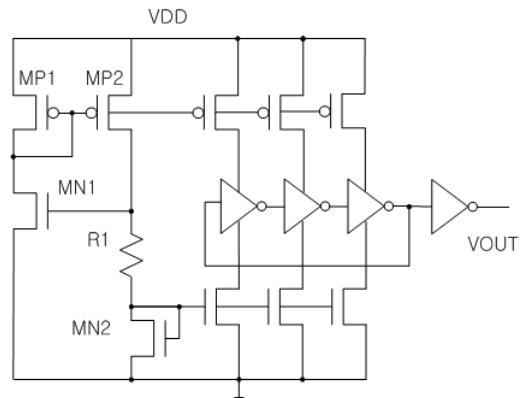


그림 6. 동작온도에 안정된 링 발진기 회로
Fig. 6 Temperature stable ring oscillator circuit

시뮬레이션 결과 상온을 기준으로 온도가 -10°C에서 60°C로 변화할 때 주파수의 변화율은 1% 이내였다. 그러나 온도가 -20°C 이거나 혹은 100°C 이상 일 때 에러는 약 3내지 4% 정도로 증가하였으며, 온도가 -20°C 이하로 더 감소할 경우 상온에 비해 에러는 빠르게 증가하였다.

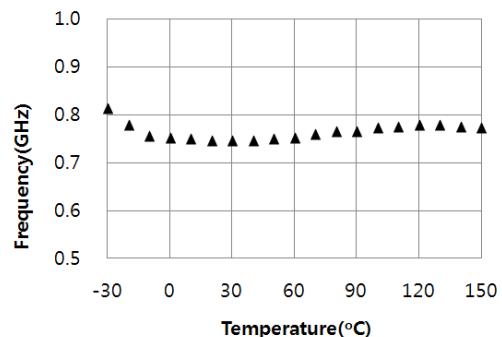


그림 7. 온도에 따른 링 발진기의 출력특성
Fig. 7 Output characteristics of ring oscillator with temperature

2.3. 온도에 따라 출력주파수가 변화하는 링 발진기

그림 8은 온도에 따른 특성 변화를 보상하지 않은 일반적인 링 발진기 회로로서 6247단으로 구성하였으며, 온도에 따른 출력주파수의 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다. 동작온도가 -30°C에서 150°C까지 변화할 때 링 발진기의 출력 주기는 880nsec.에서 2100nsec.로 변화하였다.

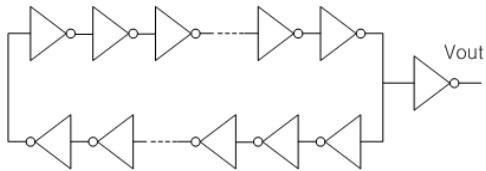


그림 8. 일반적인 링 발진기
Fig. 8 Conventional ring oscillator

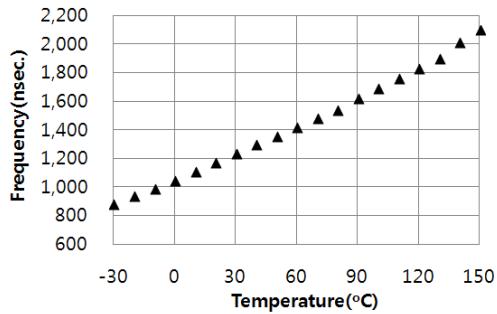


그림 9. 온도에 따른 일반적인 링 발진기의 출력특성
Fig. 9 Output characteristics of conventional ring oscillator with temperature

III. 결과 분석

그림 8의 링 발진기 출력이 high인 동안 그림 6의 링 발진기의 출력 신호를 해아리면 온도에 따른 디지털 출력 값을 얻을 수 있다. 그림 10은 설계된 온도센서의 시뮬레이션 값과 상온을 기준으로 온도에 따른 디지털 출력 값을 계산한 것이다. 그림 11은 시뮬레이션을 통하여 얻어진 카운터의 출력 값을 온도로 환산하여 실제 온도와 비교하여 그 에러를 나타낸 것이다.

표 1. 온도센서의 특성비교
Table. 1 Characteristics comparisons of temperature sensor

temp. sensor	supply voltage(vlots)	error(°C)	temp. range(°C)	process	structure
1)	1.0	-1.0~0.8	50~125	90nm	analog reference voltage / analog-to-digital converter
2)	1.8	± 0.05	-20~100	0.18μm	
3)	3.3	± 0.022	-55~125	0.35μm	
4)	3.3	-0.7~0.9	0~100	0.35μm	
5)	3.0	-0.6~0.6	-40~60	0.35μm	
6)	0.3~1.0	± 0.8	-50~125	65nm	
7)	-	-1.4~1.6	20~75	65nm	
proposed circuit	1.5	-0.7~1.0	-20~70	0.18μm	frequency-to-digital converter
		-0.45~0	-10~60		

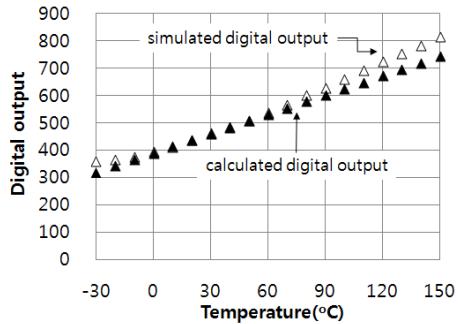


그림 10. 온도센서의 시뮬레이션과 계산된 디지털 출력값
Fig. 10 Simulated and calculated digital outputs of temperature sensor

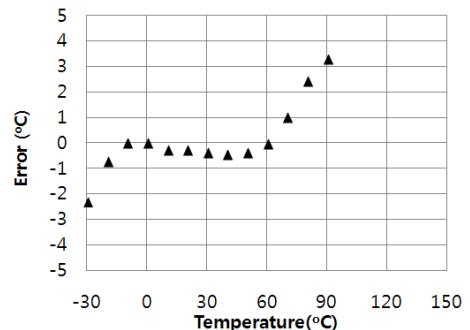


그림 11. 온도에 따른 온도센서의 에러
Fig. 11 Error of temperature sensor with temperature

그림 10의 결과와 동일하게 회로의 온도가 -20°C 이하이거나 혹은 70°C 이상인 경우 에러는 증가함을 알 수 있다. 기존에 발표된 온도센서 및 본 논문에서 제안한 온도센서의 특성을 표1에 나타내었다. 본 논문에서 제안한 온도센서의 경우 동작하는 온도 범위를 -10°C에

서 60°C로 제한하면 에러는 -0.45°C에서 0°C 정도로 우수한 특성을 보여주었다. 그러나 그림 11에서 보듯이 동작온도 범위를 -20°C에서 70°C로 확장하면 에러는 -0.7에서 1.0으로 증가하였다. 이는 기존의 연구와는 달리 시스템을 간단히 구성하기 위해 외부 클럭을 사용하지 않고 그림 7의 특성을 가지는 링 발진기를 사용함에 의한 것으로 생각된다. 그러나 기존의 연구결과들과 비교하여 볼 때, 낮은 공급전압을 사용함에도 불구하고 측정 가능한 온도범위와 에러를 고려하면 충분히 사용 가능한 특성을 보여주었다. 또한 기존의 방법들과는 달리 외부에서 인가 되는 기준 신호 혹은 클럭 신호 등이 필요치 않으므로 시스템의 구성을 간소화시킬 수 있는 장점이 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 주파수-디지털 변환을 이용하는 온도 센서를 설계하였다. 시간-디지털 변환이나 주파수-디지털 변환을 사용하는 온도센서의 경우 외부에서 클럭 혹은 기준 신호 등을 입력하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서는 외부 신호의 인가 없이 온도를 측정할 수 있도록 회로를 구성하였다. 설계된 회로의 공급전압은 1.5volts를 사용하였으며, CMOS 공정은 0.18 μ m 기술을 사용하였다. 설계된 회로의 경우 동작온도가 -20°C에서 70°C까지 변화할 때 에러는 -0.7°C에서 1.0°C 이내였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the research grant of the Busan University of Foreign Studies in 2015

REFERENCES

- [1] M. Sasaki, M. Ikeda and K. Asada, "A Temperature Sensor With an Inaccuracy of -1/+0.8oC Using 90nm 1V CMOS for Online Thermal Monitoring of VLSI Circuits," *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, vol. 21, no. 2, pp.201-208, May 2008.
- [2] J. He, C. Zhao, S. Lee, K. Peterson, R. Geiger and D. Chen, "Highly linear very compact untrimmed on-chip temperature sensor with second and third order temperature compensation," *IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 288-291, 2010.
- [3] C. W. Lin and S. F. Lim, "A Highly Linear Temperature Sensor," in *Proceedings of 8th International Conference Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecomm, amnd Information Technology*, pp. 74-77, 2011
- [4] Poki Chen, Chun-Chi Chen, Chin-Chung Tsai and Wen-Fu Lu, "A Time-to-Digital-Converter-Based CMOS Smart Temperature Sensor," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 8, pp.1642-1648, Aug. 2005.
- [5] Chun-Chi Chen, Poki Chen, An-Wei Liu, Wen-Fu Lu and Yu-Chi Chang, "An accurate CMOS delay-line-based smart temperature sensor for low-power low-cost systems," *Measurement Science and Technology*, vol.17, no. 4, pp.840-846, April 2006.
- [6] Shi-Wen Chen, Ming-Hung Chang, Wei-Chih Hsieh and Wei Hwang, "Fully On-Chip Temperature, Process, and Voltage Sensors," in *Proceedings of International Symposium on Circuits and Systems*, pp.2617-2620, 2013.
- [7] Shuang Xie and Wai Tung Ng, "Design of a , "A Low Power All-digital Self-calibrated Temperature Sensor using 65nm FPGAs," in *Proceedings of International Symposium on Circuits and Systems*, pp.2617-2620, 2013.



최진호(Jin-Ho Choi)

1985 부산대학교 전자공학과 공학사
1987 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
1992 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1992~1996 하이닉스 반도체 근무
1996~ 부산외국어대학교 근무
※관심분야 :임베디드시스템, VLSI 설계