

펄스 수축방식 기반의 지연버퍼를 이용한 온-칩 디지털 온도센서

On-Chip Digital Temperature Sensor Using Delay Buffers Based the Pulse Shrinking Method

윤 승 찬*, 김 태 운**, 최 호 용**★

Seung-Chan Yun*, Tae-Un Kim**, Ho-Yong Choi**★

Abstract

This paper proposes a CMOS temperature sensor using inverter delay chains of the same size based on the pulse shrinking method. A temperature-pulse converter (TPC) uses two different temperature delay lines with inverter chains to generate a pulse in proportion to temperature, and a time-digital converter (TDC) shrinks the pulse using inverter chains of the same size to convert pulse width into a digital value to be insensitive to process changes. The chip was implemented with a $0.49 \mu\text{m} \times 0.23 \mu\text{m}$ area using a $0.35 \mu\text{m}$ CMOS process with a supply voltage of 3.3V. The measurement results show a resolution of $0.24 \text{ }^\circ\text{C/bit}$ for 9-bit data for a temperature sensor range of $0 \text{ }^\circ\text{C}$ to $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

요 약

본 논문은 동일 크기의 인버터 체인을 가진 지연 버퍼를 사용한 펄스 수축방식에 기반된 CMOS 온도 센서를 제안한다. 온도 센서는 2 개의 서로 다른 온도 지연 라인을 가진 온도에 비례하여 펄스를 생성하는 온도-펄스 변환기(TPC)와 공정 변화에 민감하지 않도록 동일 크기를 가진 인버터 체인을 사용하여 펄스를 수축하여 디지털 값으로 변환하는 시간-디지털 변환기(TDC)로 구성된다. 칩은 공급 전압이 3.3 V인 $0.35 \mu\text{m}$ CMOS 공정을 이용하여 $0.49 \mu\text{m} \times 0.23 \mu\text{m}$ 의 면적으로 구현되었다. 측정 결과 $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 센서 범위에 분해능은 9-비트 데이터에서 $0.24 \text{ }^\circ\text{C/bit}$ 를 가진다.

Key words : temperature sensor, digital, pulse shrinking method, on-chip, time-to-digital converter

* Magnachip Semiconductor Co.

** School of Electrical and Computer Engineering,
Chungbuk National University

★ Corresponding author

E-Mail : hychoi@cbnu.ac.kr, Tel : +82-43-261-3231

※ Acknowledgment

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1D1A1B07046871) and the KIAT grant funded by the Korea government MOTIE (No. 0001883).

Manuscript received Jun. 6, 2019; revised Jun. 19, 2019; accepted, Jun. 25, 2019.

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.

1. 서론

최근, 칩의 미세화에 따라 대규모 집적화가 진행되고 전력밀도가 크게 증가하고 있어, 성능과 신뢰성을 유지하기 위해 칩 상(on-chip)에서의 열적 모니터링 및 관리가 중요해지고 있다[1-2]. 이 칩 상 온도센서들은 기본적으로 적은 면적과 낮은 전력 소모가 요구된다.

온도센서는 크게 BJT를 이용한 방식과 시간-디지털 변환기(time-to-digital converter, TDC)를 이용한 디지털 방식으로 나누어진다. BJT 방식의 온도센서는 BJT를 사용한 밴드 갭(bandgap) 기준회로를 기반으로 온도에 따라 가변되는 전압을 얻는 방식으로, 높은 해상도를 얻을 수 있으나, BJT 제

작 공정이 요구되고 칩 면적과 전력소모를 많은 단점이 있다[3].

디지털 방식 온도센서는 TDC를 기반으로 적은 면적과 저전력 동작으로 최근 많이 연구되고 있다 [4-7]. 이중 펄스 수축(pulse shrinking) 방식[5]은 일정량의 펄스가 감소하는 딜레이 루프를 이용한 방식으로 높은 해상도에서도 면적이 일정하며 변환시간도 준수한 편이나, 공정 변화에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 동일 크기의 인버터 체인을 가진 지연 버퍼를 사용한 펄스 수축방식 TDC에 기반된 온도센서를 제안한다. 본 방식은 동일 크기의 인버터 체인을 이용함으로써 공정 변화의 영향이 적고 저면적으로 구현 가능하다.

II. 지연 버퍼를 이용한 펄스 수축방식 온도센서

그림 1은 제안하는 펄스 수축방식 온도센서의 블록도이다. 이 온도센서는 온도에 비례하는 인버터 체인의 전파지연시간을 단일 펄스(PG_OUT)로 변환해 주는 온도-펄스 변환기(temperature-to-pulse converter, TPC)와 생성된 펄스의 폭을 디지털 값으로 변환하는 시간-디지털 변환기(time-to-digital, TDC)로 구성된다.

외부 Enable 신호에 의해 동작되는 시간 제어 로직(timing control logic)의 Start 신호에 의해, TPC에서 온도에 비례하는 펄스 PG_OUT를 생성한다. 생성된 펄스는 TDC에서 동일 크기의 인버터 지연 버퍼를 가진 펄스폭 수축 회로를 이용하여 펄스 폭을 일정량 수축하고, 이를 피드백을 통해 펄스가 소멸될 때까지 반복 수축하고, 이의 수축 횟수를 디지털 값으로 출력한다.

기존의 펄스 수축방식은 인버터 체인중 한 인버터의 크기를 크게 하여 충방전 시간의 차이로 펄스를 수축하게 하나[5], 수축량을 정확히 조절하기 위해 인버터의 크기를 미세하게 조절하여야 하고, 공정 변화에 민감하다. 이에 본 수축회로 방식은 동일한 크기의 인버터로 구성된 지연 버퍼를 이용하여 공정의 오차를 개선하기 위한 동일 크기를 가진 인버터 체인으로 구성된 펄스 수축회로를 제안한다.

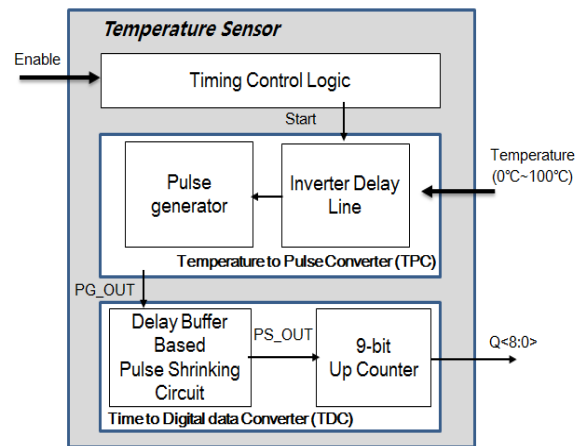


Fig. 1. Block diagram of digital temperature sensor.
그림 1. 디지털 온도 센서 블록도

1. 온도-펄스 변환기

그림 2는 온도-펄스 변환기(TPC) 블록도이다. TPC는 두 개의 지연 선(delay line)과 하나의 XOR 게이트로 구성하여 온도에 비례하는 펄스폭을 가진 펄스를 생성한다. delay line은 온도에 민감한 회로(thermal sensitive delay line, TS_delay)와 온도에 둔감한 회로(thermal insensitive delay line, TL_delay)로 구성된다. TL_delay는 그림 3과 같이 기준 전류 생성회로를 통해 인버터에 무관한 전류를 공급하여 인버터에 미치는 온도영향을 최소화 한다. 기준 전류 생성회로는 트랜지스터 MP3를 MOS 다이오드 형태로 이용하여 온도에 덜 민감한 전류를 생성하여[8], 인버터에 온도 무관한 전류를 인가할 수 있다.

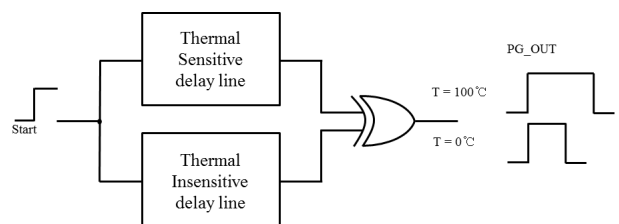


Fig. 2. Block diagram of temperature-to-pulse converter.
그림 2. 온도-펄스 변환기 블록도

TPC에서 TS_delay의 전파지연 시간은 온도에 비례하는 값을 가지고, TL_delay는 온도에 무관한 일정 전파지연 시간을 가진다. 이는 지연 시간 차이를 펄스 폭으로 가진 PG_OUT을 출력하게 된다. 즉 TS_delay이 온도에 비례한 전파지연 시간을 가지므로 PG_OUT은 온도에 비례하게 된다.

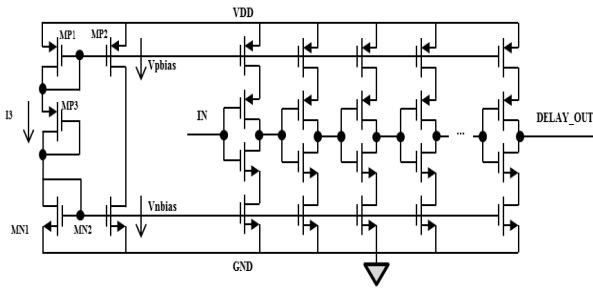


Fig. 3. Thermal insensitive delay line.
그림 3. 온도에 둔감한 지연 회로

2. 펄스 수축방식 시간-디지털 변환기

펄스 수축방식 시간-디지털 변환기는 입력된 펄스를 일정 시간만큼 감소시키는 피드백 루프를 통해서 펄스가 소멸될 때까지 피드백 하여 이의 횟수를 세어 디지털 값으로 출력하는 회로이다.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 펄스 수축방식 시간-디지털 변환기이다. 펄스수축 지연버퍼(delay buffer based pulse shrinking circuit, DB_PSC)는 입력 펄스폭을 일정 값만큼 감소시켜 주는 펄스 축소 회로이다. 이 펄스 축소 회로는 그림 5와 같이 동일크기의 인버터로 구성된 지연 버퍼로 구현된다. Delay line 회로는 인버터 체인으로 구성되어 피드백을 구현하기 위해 입력 펄스보다 큰 지연시간을 가진다. 카운터(counter)는 펄스폭이 줄어들면서 펄스가 소멸할 때까지 피드백 되는 횟수를 디지털 값으로 출력해 준다. 이 회로는 온도센서의 해상도를 고려하여 9-비트로 설계한다.

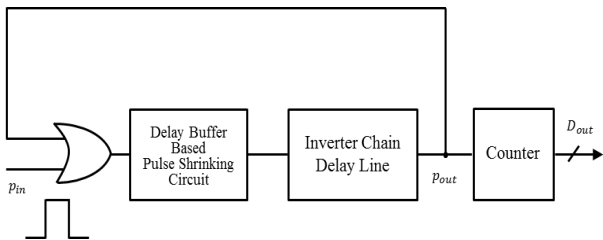


Fig. 4. Block diagram of time-digital converter using pulse shrinking method.

그림 4. 펄스 수축방식 시간-디지털 변환기의 블록도

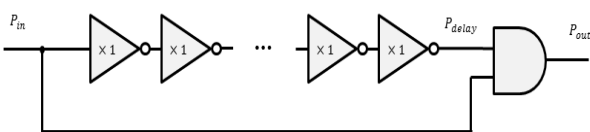


Fig. 5. Proposed pulse shrinking circuit.
그림 5. 제안된 펄스 수축 회로

제안한 펄스 수축방식은 그림 5와 같이 동일 크기의 inverter chain으로 이루어진 지연 버퍼들과 2-입력 AND 게이트로 구성된다.

입력 핀(pin)에 펄스가 인가되면 지연 버퍼를 거쳐 지연되는 신호와 본래 입력 신호에 의해 그림 6과 같이 지연 버퍼에서 지연시간만큼 수축된 펄스가 생성된다.

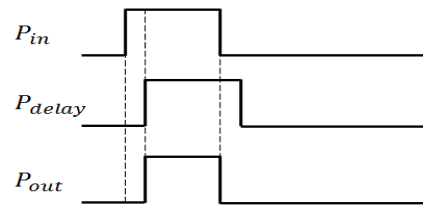


Fig. 6. Pulse shrinking.
그림 6. 펄스 수축

제안된 온도센서는 해상도와 면적의 관계가 서로 독립이므로 높은 해상도에서 저면적, 저전력 동작이 가능하다. 동일 크기의 인버터 만을 사용하므로 공정 변화에 의한 특성은 동일하게 나타난다. 또한 이 오차는 동일 특성의 인버터에서 발생했기 때문에 간단한 1회 보정(one-point calibration) 만으로 센서 보정이 가능하다. 그리고, 제안한 본 방식은 기존의 트랜지스터 크기만으로 펄스 수축값을 조절하는 방식과는 달리, 인버터의 개수나 부하 용량의 조절을 통해 다양하고 정밀하게 펄스 수축값을 설정할 수 있다.

III. 측정 결과

II장에서 제안한 펄스 수축방식 온도센서 칩이 0.35 μm 공정을 사용하여 제작되었다. 그림 7은 레이아웃도와 칩 사진이고, 코어 면적은 0.49 mm x 0.23 mm이다. 딜레이 버퍼회로는 트랜지스터 사이즈 변화에 민감하기 때문에 더미 트랜지스터를 사용하여 공정 변화를 최소화 하였다.

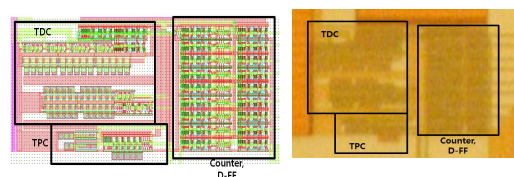


Fig. 7. Layout and chip photograph.
그림 7. 레이아웃과 칩 사진

1. 온도 변화에 따른 TPC 출력

그림 8은 온도에 따른 PG_OUT 측정 파형을 나타낸다. (a), (b)는 각각 20 °C, 60 °C 온도에서 측정된 결과로 PG_OUT 는 각각 88 ns, 122 ns로 온도에 따라 PG_OUT 시간이 증가한다.

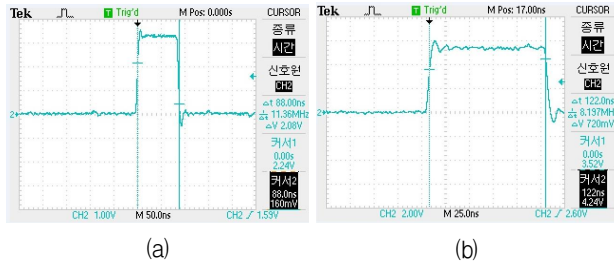


Fig. 8. PG_OUT waveform according to temperature. (a) 20 °C, (b) 60 °C.

그림 8. 온도에 따른 PG_OUT 파형 (a) 20 °C, (b) 60 °C

그림 9는 인버터 체인의 전파 지연시간이 온도변화에 따라 변화하는 코너 시뮬레이션 SS와 TT의 결과와 칩 측정 결과를 나타낸다. 10 °C 온도변화마다 약 10 ns 증가함을 보여준다.

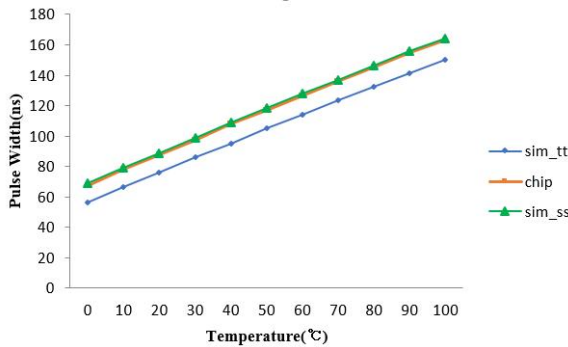


Fig. 9. Temperature-pulse width characteristics of TPC.

그림 9. TPC의 온도-펄스 폭 특성

시뮬레이션 상의 TPC 출력 신호는 온도 변화에 따라, 펄스 폭이 SS의 경우에는 68.8 ns~164 ns로 변하고, 측정 값은 67.7 ns~160.1 ns로 되어, 측정 값은 실제 코너 시뮬레이션 SS 환경의 시뮬레이션 결과와 거의 같은 값으로 확인되었다.

2. 온도 변화에 따른 TDC 출력

그림 10은 TDC의 PS_OUT 파형을 나타낸다. PS_OUT은 펄스 수축회로에서 피드백 되어 발생하는 펄스신호로 펄스 수축을 반복하여 이후 펄스가 소멸함을 확인할 수 있었다. TDC에 입력되는 펄스

PG_OUT은 온도가 증가할수록 펄스폭이 증가하므로, 높은 온도에서 TDC의 피드백 횟수는 증가하고, 9-비트 디지털 값으로 출력된다.

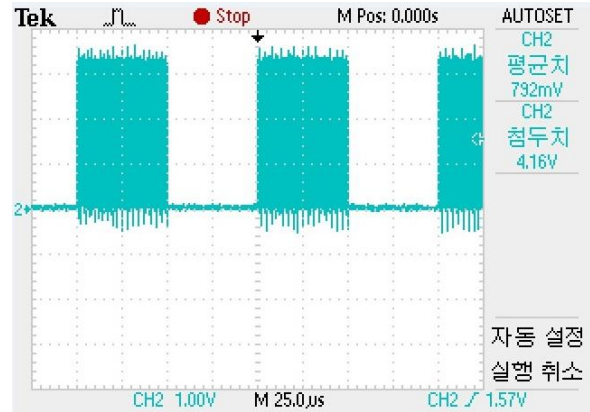


Fig. 10. PS_OUT output waveform of TDC.

그림 10. TDC의 PS_OUT 출력 파형

표 1은 각 온도구간에 따른 디지털 값 Q<8:0>이고, 그림 11은 온도에 대한 시뮬레이션 값과 칩 측정결과 값을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 온도범위 0 °C~100 °C에서 약 0.24 °C/bit의 해상도를 가지며 온도 오차는 약 -4.5 °C~4 °C이다. 0°C~70°C의 온도범위에서는 정상적으로 온도가 디지털 값으로 출력되나, 70 °C 이상에서는 해상도 감소현상이 발생하였다. 그 이유로 펄스 수축량은 일정 펄스폭 이상에서는 온도에 무관하게 수축되나 일정 펄스폭 이하에서는 펄스 수축량이 다르게 되어 오차가 발생한 것으로 판단된다. 또한 칩 간 온도 에러는 1 °C 이하로 되어 공정상의 변화에 대한 영향을 알 수 있다. 소모 전력은 6.4 μW로 가졌다.

Table 1. Q<8:0> digital value according to temperature.

표 1. 온도에 따른 디지털 값 Q<8:0>

T(°C)	Q<8:0>
0	000011010
10	001000010
20	001101110
30	010100000
40	011010100
50	100001010
60	100111101
70	101100101
80	110001010
90	110101001
100	110111011

3. 기존 방식과의 비교

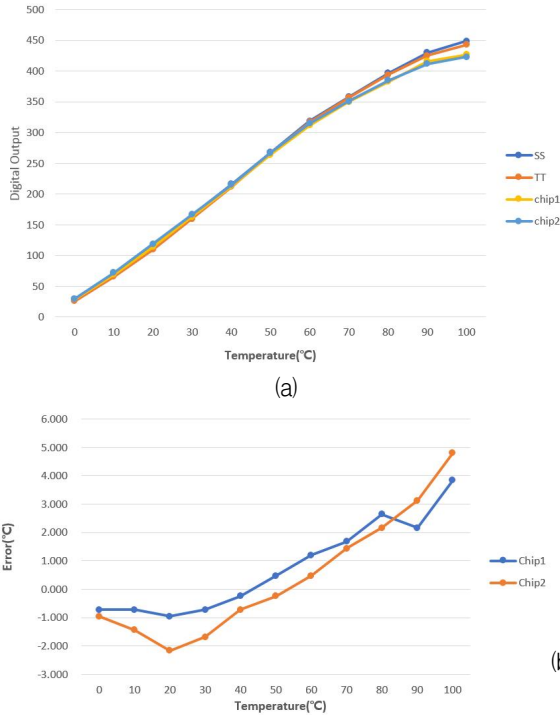


Fig. 11. (a) Temperature-digital characteristics, (b) Temperature error of chips.
그림 11. (a) 온도-디지털 특성 (b) 칩의 온도 에러

Table 2. Comparison of electrical characteristics of digital temperature sensors.

표 2. 디지털 온도센서 전기특성 비교

	This work	Roh[7]	Ha[6]	Chen[5]
Method	TDC	BGR+ADC	TDC	TDC
Calibration (Level of difficulty)	One-point	One-point	One-point	Two-point
Process	0.35 μ m CMOS	0.18 μ m CMOS	0.13 μ m CMOS	0.35 μ m CMOS
Supply voltage(V)	3.3	3.3	1.2	3.3
Temperature range(°C)	0~100	-40~85	0~100	0~100
Resolution (°C)	0.24	0.0088	0.78	0.16
Error(°C)	-4.5~4	-	-4~4	-0.7~0.9
Conversion rate(S/s)	10	333k	5k	2
Power consumption (μ W)	6.4	2,069	12,000	10
Area (mm ²)	0.12	0.2446	0.12	0.175

표 2는 제안한 온도센서와 기존방식의 온도센서 회로의 성능 비교를 나타낸 것이다. 제안한 온도센서는 Ha 방식[6]에 비해 온도 오차가 크고, conversion rate는 느리지만, 해상도는 약 3배, 면적은 공정비

를 고려하면 약 4배 작게 설계되었다. Chen 방식 [5]의 경우 온도 오차나 해상도 성능은 낮으나, 면적과 전력소모는 본 방식이 더 우수하다. 또한 본 방식은 펄스 수축시 동일 크기의 인버터 만을 사용하므로 공정 변화에 무딘 특성을 가진다. 온도 오차가 약간 크기 때문에 자가 재생(self-refresh)용 클럭 생성회로[7] 같은 정밀 온도 감지를 요하지 않는 회로에 적합하다.

IV. 결론

본 논문은 지연 버퍼를 이용한 펄스 수축방식 온도센서를 설계하였다. 온도센서는 인버터 체인을 이용한 TPC와 동일한 크기의 인버터 체인으로 구성된 지연버퍼를 이용한 펄스 수축방식의 TDC로 구성하였다. 칩 구현 결과 0 °C에서 100 °C까지의 동작온도에서 sampling rate 10 S/s로 0.24 °C/bit의 해상도와 6.4 μ W의 전력소모로 동작하고, 0.49 mm x 0.23 mm의 저면적으로 설계되었다. 동일 크기의 인버터 체인을 사용하기 때문에 공정 변동에 둔감하며 온도 오차에 크게 영향을 받지 않으나, 높은 온도 구간에서 해상도의 감소현상으로 인하여 다소 온도 오차가 있어, 자가재생용 클럭 생성회로 같은 정밀 온도 감지를 요하지 않는 회로에 적합하다.

References

[1] C. Chung and C. Yang, "An autocalibrated all-digital temperature sensor for on-chip thermal monitoring," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II*, vol.58, no.2, pp.105-109, 2011. DOI: 10.1109/TCSII.2010.2104016

[2] C. S. Singh and K. Halonen, "A CMOS based μ -power smart temperature sensor for on-chip thermal monitoring," in *Proc. of IEEE the 57th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp.382-385, 2014. DOI: 10.1109/CICC.2015.7338490

[3] A. L. Aita, M. A. P. Pertijs, K. A. A. Makinwa, and J. H. Huijsing, "A CMOS smart temperature sensor with a batch-calibrated inaccuracy of ± 0.25 °C (3σ) from -70°C to 130°C," in *Proc. of*

IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, pp.342 - 343, 2009.

DOI: 10.1109/ISSCC.2009.4977448

[4] S. and K. Klepacki, "An FPGA-integrated time-to-digital converter based on two-stage pulse shrinking," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol.59, no.6, pp.1663-1670, 2010.

DOI: 10.1109/TIM.2009.2027777

[5] P. Chen, C.-C. Chen, C.-C. Tsai, and W.-F. Lu, "A time-to-digital converter based CMOS smart temperature sensor," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.40, no.8, pp.1642-1648, 2005.

DOI: 10.1109/JSSC.2005.852041

[6] D. Ha, K. Woo, S. Meninger, T. Xanthopoulos, E. Crain, and D. Ham, "Time-domain CMOS temperature sensors with dual delay-locked loops for microprocessor thermal monitoring," *IEEE Trans. on VLSI Syst*, vol.20, no.9, pp.1590-1601, 2012. DOI: 10.1109/TVLSI.2011.2161783

[7] G. Roh, "Design of self-refresh controller for low-power 1T graphic memory," Master Thesis, Chungbuk National Univ., 2013.

[8] H. J. Oguey and D. Aebischer, "CMOS current reference without resistance," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol.32, no.7, pp.1132-1135, 1997.

DOI: 10.1109/4.597305

BIOGRAPHY

Seung-Chan Yun (Member)

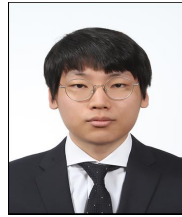


2015 : BS degree in Electronics Engineering, Chungbuk National University.

2017 : MS degree in Semiconductor Engineering, Chungbuk National University.

2017~present : Research Engineer, Magnachip Semiconductor Co.

Tae-Un Kim (Member)



2019 : BS degree in Electronics Engineering, Chungbuk National University.

2019~present : MS student in Semiconductor Engineering, Chungbuk National University.

Ho-Yong Choi (Member)



1980 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1982 : MS degree in Electronics Engineering, KAIST

1994 : Ph.D. degree in Electronics Engineering, Osaka University.

1985~1996 : Associate Professor, Pukyung National University.

1996~present : Professor, Chungbuk National University.