

논문 2004-41SD-12-9

적외선 탐색기 신호처리를 위한 극저온 밴드갭 회로 동작 조건 제안 및 제작된 칩의 성능 분석

(Operating Conditions Proposal of Bandgap Circuit at Cryogenic Temperature for Signal Processing of Infrared Detector and a Performance Analysis of a Manufactured Chip)

김 연 규*, 강 상 구**, 이 희 철**

(Youn Kyu Kim, Sang-Gu Kang, and Hee-Chul Lee)

요 약

적외선 소자로부터 생성되는 신호의 잡음 특성의 향상, 즉 좋은 영상을 얻기 위해서 적외선 영상신호 취득회로(ROIC)에서는 안정적인 기준 전압원이 필요하다. 본 논문은 극저온인 77K에서 동작하는 적외선 영상신호 취득회로(readout integrated circuit)를 위한 밴드갭 회로를 처음으로 제작한 후 측정, 평가하여 그 실용 가능성을 입증하고 있다. 밴드갭 회로는 대표적인 전압 기준회로로서 기존에 발표된 대부분의 밴드갭 회로는 실온에서 동작하는 것이며, 액체질소 온도 77K에서는 그 특성이 적합하지 않다. 본 논문에서는 극저온에서 동작하는 밴드갭 회로 설계를 위하여, 그에 맞는 회로를 선택하여 온도변화에 따른 사용되는 소자들의 파라미터에 대한 이론정립을 통한 그것의 특성을 살펴보고, 이러한 특성들을 고려하여 저온동작에 적합하도록 하였다. 이 회로는 Hynix 0.6um standard CMOS 공정을 통해서 제작되었으며, 측정된 출력전압(V_{out})은 60K에서 110K까지 $1.0396 \pm 0.0015V$ 로서 기존의 실온에 동작하던 밴드갭 회로보다 더 높은 안정도를 보여주었다.

Abstract

A stable reference voltage generator is necessary to the infrared image signal readout circuit(ROIC) to improve noise characteristics of signal originated from infrared devices, that is, to gain good images. In this paper, bandgap circuit operating at cryogenic temperature of 77K for Infrared image ROIC(readout integrated circuit) was first made. It demonstrates practical use possibility through taking measurements and estimations. Bandgap circuit is a representative voltage reference circuit. Most of bandgap reference circuits which are presented so far operate at room temperature, and their characteristic are not suitable for infrared image ROIC operating at liquid nitrogen temperature, 77K. To design bandgap circuit operating at cryogenic temperature, suitable circuit is selected and the parameter characteristics of used devices as temperature change are seen by a theoretical study and fitted at liquid temperature with considering such characteristics. This circuit has been fabricated in the Hynix 0.6um standard CMOS process, and the output voltage measured shows that the stability is $1.042 \pm 0.0015V$ over the temperature range of 60K to 110K and is better than bandgap circuits operated at room temperature.

Keywords : bandgap reference circuit, cryogenic temperature, temperature coefficient, ROIC

I. 서 론

광자형 적외선 검출기는 0.75um~1mm의 파장을 갖

는 전자파의 복사에 의해서 야기되는 전기적인 신호를 감지하여 영상신호를 얻는 영상센서이다. 이러한 광자형 적외선 검출기는 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 하나는 입사되는 광전자들에 의해 여기되는 전자에 의한 도전을 변화나 광전기력 변화를 가지는 광자형 적외선 감지 소자배열(Infrared detector array)이다. 그리고 나머지 하나는 감지 소자에서 발생한 전기적 신호를 영상신호 처리에 적합하도록 순차적으로 읽어 내는 신호

* 정희원, 한국항공우주연구원 지상수신관제그룹 (Satellite Mission Operation Department, KARI)

** 정희원, 한국과학기술원 전자전산학과 (Dept. of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST)

접수일자: 2004년3월30일, 수정완료일: 2004년11월30일

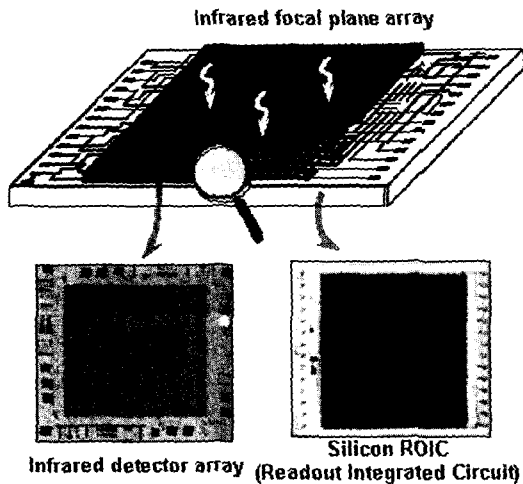


그림 1. 적외선 검출기 구조
Fig. 1. Structure of infrared detector.

취득회로(readout integrated circuit)이다. 이 두 부분은 각각 다른 종류의 기관에서 제작되어 이종 접합을 통하여 시스템을 이룬다. 이렇게 이종 접합된 적외선 검출기의 구조가 그림 1에 나타나 있다. 이것은 적외선이 입사되지 않을 때에는 열적으로 생성되는 carrier들의 영향, 즉 열잡음을 없애기 위해서 극저온까지 냉각할 수 있는 냉각 장치를 필요로 하고 있다. 이러한 냉각기 중에서도 액체 질소를 이용한 Joule-Thomson 냉각기가 많이 사용되고 있다.

그리고, 앞의 그림 1에 있는 적외선 영상 신호 취득회로(ROIC) 중 대표적으로 사용되는 ROIC의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 이 그림을 통해 동작 원리를 간략히 살펴보면 적외선 감지 소자가 적외선을 받으면 이에 해당하는 광전류가 생성될 것이고 이러한 전류에 해당하는 전하가 처음 C_{int} 에 저장되어 있던 전하(이것은 V_{ref} 와 같은 값이다.)에서 빠져나가게 되면서 C_{int} 의 전압은 내려간다. 결과적으로 C_{int} 의 전압과 V_{ref} 차이에 의해서 영상 신호화 되는 것이다. 따라서 여기에서 가장 중요한 것은 V_{ref} 가 어떠한 조건에서든지 정확하고 안정적인 전압을 유지해야한다. 특히, 여기에서 적외선 검출기의 잡음이 $300\mu V$ 이하인데, ROIC의 V_{ref} 의 변화에 의한 잡음이 전체 잡음의 5%이하 만큼 영향을 줄 만큼 충분히 작게할 필요성이 있다. 그러면 V_{ref} 의 변화에 의한 잡음이 $100\mu V$ 이하가 되어야한다.

일반적으로 적외선 영상 신호처리회로에서 V_{ref} 는 외부에서 직접 전원을 가해주는 방식을 쓰는 경우가 많다. 하지만 이러한 방법은 잡음 결합문제를 일으킬 수 있으므로 전압 기준회로를 이용하여 V_{ref} 를 만드는 것

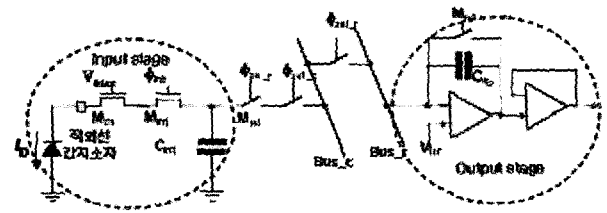


그림 2. 신호처리회로(ROIC)의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of ROIC.

이 좋은 방법일 것이다.

앞에서 언급했듯이, 광자형 적외선 검출기는 열잡음 감소를 위하여 액체 질소를 이용한 Joule-Thomson 극저온 냉각기를 사용하여 77K의 환경에서 동작한다. Joule-Thomson 냉각기는 일반적으로 미사일 IR Seeker와 같은 적외선 탐색기에 많이 사용되는 냉각기인데, 다음 그림 3과 같은 냉각 특성을 가진다. 그림 3은 시간에 따라서 질소 가스의 압력 변화와 시간에 따른 냉각기의 온도 센서전압을 나타낸다. 여기에서 볼 수 있듯이, 센서전압이 항상 일정치 않고 변화가 있는 것을 알 수 있다. 이것을 온도의 관점에서 본다면 0.4 K~2K의 온도 변화가 냉각기에서 생기는 것이다. 만약 앞의 ROIC에서 온도에 대해서 고려하지 않은 기준회로를 이용한다면 앞의 온도 변화에 대해서 약 수백 μV 에서 수mV의 출력전압 변화가 생긴다. 적외선 소자에서 생기는 잡음이 $300\mu V$ 이하임을 고려한다면 이것은 적외선 영상에 큰 잡음으로 나타날 것이다. 따라서 이러한 온도 변화에도 안정한 기준 전압을 얻을 수 있는 기준 전압 회로가 필요할 것이다. 일반적으로 안정적인 전압원을 얻고자 많은 연구가 되어왔고 특히 그중에서 밴드갭 기준 회로는 대표적인 기준 전압 회로중 하나이다. 이것은 비교기, ADC등 많은 아날로그 회로에 사용되고 있으며, 동작 원리는 음의 온도 계수를 가지는 전압과 양의 온도 계수를 가지는 전압에 적당한 이득을 곱해서 두 전압을 더해서 온도에 대해서 일정한 전압을 얻는 것이다. 그러나 이러한 밴드갭 기준 회로는 많이 연구되었지만, 발표되었던 밴드갭 기준 회로들은 상온의 범위에서 온도의 민감도를 줄인 회로들이다. 앞에서 보았듯이, 광자형 적외선 검출기는 극저온인 77K에서 동작하는 것이므로 이에 적합한 즉 극저온에서 온도의 변화에 안정적인 전압을 얻을 수 있는 밴드갭 기준회로가 필요하다.

그래서 본 논문에서는 극저온에서 동작할 수 있는 밴드갭 기준회로가 동작할 수 있도록 먼저 77K에서의 소자 파라미터의 특성에 대해서 살펴보았다. 특히 음의

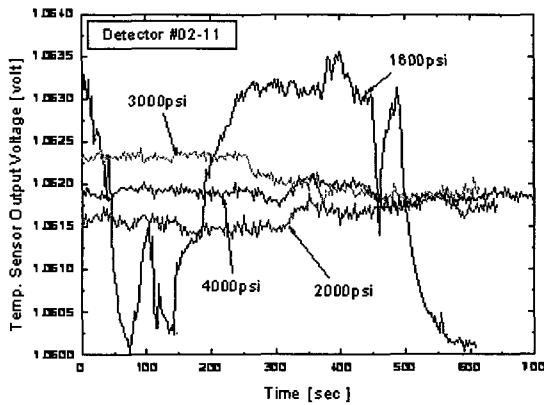


그림 3. Joule-Thomson 냉각기의 시간과 질소가스 압력에 따른 온도 센서 전압(출처: 국방과학연구소)

Fig. 3. Temperature sensor voltage of Joule-Thomson cooler as a function of the time and nitrogen gas pressure.(source: ADD)

온도 계수를 갖는 전압에 대해서 살펴보고 또한 이러한 파라미터를 고려해서 밴드갭 기준회로를 선택하여 저온 특성 적합하도록 하였다. 그리고 이 회로를 실제로 Hynix 0.6μm standard CMOS 공정을 통하여 제작한 후, 이 제작한 회로를 저온 범위에서 측정하고 그 결과를 토대로 검정할 것이다.

II. 본 론

1. 극저온에서의 파라미터의 특성

밴드갭 기준 회로의 기본 개념은 음의 온도 계수를 가지는 전압과 양의 온도 계수를 가지는 전압에 음과 양의 온도 계수를 상쇄할 수 있는 이득을 곱해서 V_{out} 의 전압이 온도에 대해서 일정한 전압을 얻는 것이다. 일반적으로 음의 온도 계수를 가지는 전압으로는 BJT의 V_{BE} 혹은 다이오드 전압 V_D 를 이용하고, 양의 온도 계수를 가지는 전압은 PTAT(proportional to absolute temperature)전류, 즉 열전압(V_T)의 형태로 나오게 된다.^[1] 다음과 같이 식(1)이 밴드갭 기준 회로의 동작 원리를 잘 표현해준다. 여기에서 k 는 볼츠만 상수이고, n 은 회로내의 이득을 나타내며, q 는 전하이다.

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial T} = \frac{\partial V_D}{\partial T} + n \frac{\partial V_T}{\partial T} = \frac{\partial V_D}{\partial T} + n \frac{k}{q} = 0 \quad (1)$$

회로를 설계하기에 앞서 먼저 온도에 대한 소자들의 특성을 살펴본 후 그에 맞게 회로를 설계하여야 한다. 그

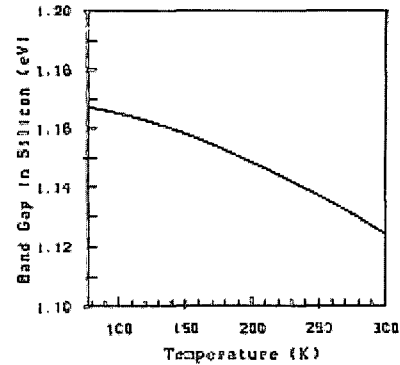


그림 4. Si의 온도에 따른 energy bandgap^[2]

Fig. 4. Energy bandgap in Silicon as a function of the Temperature.^[2]

래서 온도에 따른 소자에 파라미터의 특성을 이론과 측정에 따라 살펴본 후 그 특성이 비슷한 경향을 가진다면 그러한 이론적인 특성에 맞추어 회로를 설계하면 되겠다.

그래서 먼저 소자들의 온도 파라미터에 대한 특성을 살펴보았다. 우선적으로 77K에 대한 음의 온도 계수 값을 예측할 수 있어야 한다. 이 값을 구하기 위해서 다음과 같이 pn 다이오드 전압, V_D 에 대한 전류식 식(2)를 살펴보자.

$$I_D = I_S \exp(qV_D/kT) \quad (2)$$

여기에서 I_S 는 다음 식(3)^[1]같이 표현한다.

$$I_S = BT^{2.5} \exp(-E_g/kT) \quad (3)$$

여기에서 B 는 상수에 해당한다. 여기에서 볼 수 있듯이 I_S 는 온도의 함수임을 알수 있다. 위의 식(2), (3)을 이용하여 pn 다이오드의 음의 온도 계수식을 구할 수 있다. 이것은 다음 식(4)^[1]로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_D}{\partial T} &= \frac{V_T}{T} \ln \frac{I_D}{I_S} - 2.5 \frac{V_T}{T} - \frac{E_g V_T}{kT^2} \\ &= \frac{V_D - 2.5 V_T - E_g/q}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 T 는 절대온도를 나타내며, V_T 는 열전압, E_g 는 Si의 energy bandgap를 나타낸다. 여 1에서 E_g 도 온도 함수이다.^[2] 이것은 아래 그림 4에 나타내었다.

그래서 위의 식 (4)와 위의 그림 4와 같이 온도에 따른 energy bandgap변화를 이용하여 V_D 의 음의 온도 계수의 값을 계산해보았다. 그리고 실제로 제작되어 있던 pn 다이오드를 일정한 전류에서 온도에 따른 다이오드 전압의

표 1. 음의 온도 계수의 계산과 측정값
Table 1. Computation & Measurement values of negative temperature coefficient.

	계산	측정
실온	-1.3~-1.5mV/K	-1.4~-1.5mV/K
77K	-2.3mV/K	-2.1~-2.4mV/K

변화를 측정하여 음의 온도 계수의 값을 살펴보았다. 이것을 표 1에 나타내었다. 여기에서 측정된 pn 다이오드는 Hynix 0.6μm standard CMOS공정을 통해서 제작되었던 것이며 다이오드 면적이 144μm², 108μm², 72μm² 인 것에 대해서 측정했었다.

예측했던 바와 같이 표 1에서 보면 실온과 77K에서는 음의 온도 계수값이 다르다는 것을 알 수 있으며 그리고 이론적인 계산과 측정값은 거의 비슷한 값을 보였다. 이것은 결국 실온에서 적용된 밴드갭 기준 회로를 극저온에서는 사용할 수 없으며, 극저온에 적합한 밴드갭 기준 회로가 필요하다. 그리고 이론적인 값을 기준으로 해서 극저온 동작조건을 정립할 수 있을 것이다. 극저온에 맞는 회로의 설계는 먼저 위의 값을 알고 있어야만 할 것이다. 결과적으로 77K에서 pn 다이오드 전압의 음의 온도 계수값은 약 -2.1~-2.4mV/K의 값을 가진다. 그리고 양의 온도 계수 k/q는 온도에 따라서 일정한 값을 가지므로 앞의 음의 온도 계수를 상쇄 시킬 수 있는 이득을 곱하면 안정적인 V_{out}을 얻을 수 있다.

이러한 파라미터의 특성뿐만 아니라 이동도, 문턱 전압(V_{th})등의 특성도 온도의 함수이므로 이에 대한 고려도 필수적이다. 이동도와 V_{th}는 온도가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 보통 실온에 비해서 극저온 77K에서는 이동도가 약 6배가량 크고, V_{th}는 약 0.3V증가를 보일 것이다.^[3] 그래서 전류 레벨이 약 2배 증가의 경향성을 보인다. 또한 다이오드 양단에 걸리는 전압도 음의 온도 계수를 가지므로 실온에 비해서 약 0.3V 증가될 것이다. 이렇듯이 실온에서 달리 극저온에서는 이러한 동작 조건에 대한 것을 가지고 다음절에서 밴드갭 회로를 선택하여 극저온에 맞게 그 회로를 설계하여 77K 극저온에서 그 성능을 확인하였다.

2. 밴드갭 회로

앞의 파라미터 특성들을 고려하여 선택된 밴드갭 회로^[4]를 그림 5에 나타내었다. 먼저 이회로의 동작을 본다면 두 다이오드 D₁, D₂로 흐르는 전류 차이에 의해서 differential 구조로 되어 있는 M₃, M₄의 gate 전압의 차이만큼 전류가 M₃를 통해서 I₃가 흐른다. 이 전류는 전류

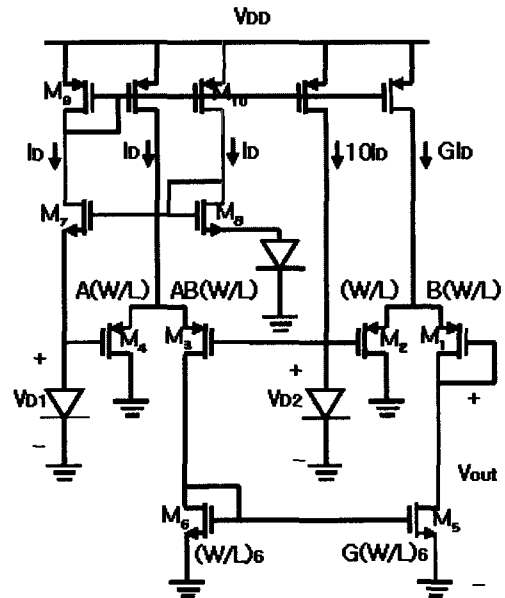


그림 5. 밴드갭 회로
Fig. 5. bandgap circuit.

거울 구조에 의해서 M₅를 통해서 I₃가 흐르게 된다. M₁과 M₂가 M₃와 M₄의 W/L가 A배 만큼 차이가 나므로 M₁과 M₂의 gate양단의 전압차이는 $\sqrt{AG}\Delta V_D$ 가 된다.^[4] V_{out}은 M₁의 gate이고, V_{D1}과 V_{D2}의 전류의 크기가 10배 만큼 차이가 나게하여 이것은 식 (5)로 표현된다.

$$V_{out} = V_{g2} + \sqrt{AG}\Delta V_D$$

$$= V_{D2} + \sqrt{AG}\frac{kT}{q}\ln 10$$
(5)

여기에서 볼 수 있듯이 음의 온도 계수를 가지는 V_{D2}와 뒷부분의 양의 온도 계수와 이득의 곱으로 전형적인 밴드갭 회로의 식으로 이루어져있다. 위의 식은 MOS 전류식을 이용하여 분명하게 확인할 수 있다. M₁~M₄를 통해서 흐르는 전류를 I₁~I₄라고 하자. I₁~I₄의 전류식과 I₃=I₁, I₄=I₂를 이용하여 다음 식(6), (7)이 된다.

$$GA(V_{gs3} - V_{th3})^2 = (V_{gs1} - V_{th1})^2$$
(6)

$$GA(V_{gs4} - V_{th4})^2 = (V_{gs2} - V_{th2})^2$$
(7)

식 (6), (7)과 V_{th1}=V_{th2}, V_{th3}=V_{th4}를 이용하여 다음 식(8)을 얻는다.

$$V_{gs1} - V_{gs2} = \sqrt{AG}(V_{gs3} - V_{gs4})$$
(8)

식(8)은 앞의 식 (5)가 되는 것을 알 수 있다.

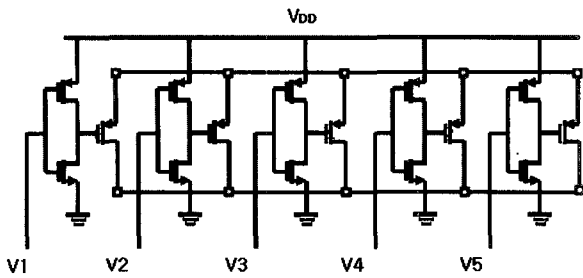


그림 6. 반전기를 이용한 M4의 구조
Fig. 6. Structure of M4 using inverter.

회로를 세부적으로 살펴보면, 트랜지스터 $M_7 \sim M_{10}$ 은 self-bias reference 구조로 구성되어 PTAT(proportional to absolute temperature) 전류를 생성시켜서 전원 전압에 대한 안정된 전압원을 만들 수 있다. 그리고 이러한 구조의 회로를 구동시키기 위해서는 start-up회로가 필요할 것이다.^[4]

그리고 이 회로의 특징은 외부에서 이득을 조절할 수 있게 하여서 저온에서의 예상외의 파라미터 변화와 공정상의 오차 등에서 생기는 문제를 해결할 수 있게 할 수 있다. 이 회로에서는 MOS의 면적 A의 값을 제어하여 이득을 임의로 바꿀 수 있게 하였다. 그래서 M_3, M_4 는 다음과 같이 반전기를 이용한 구조로 이루어져 있다. 그림 6은 M_4 에 대한 구조를 보여주고 있다. 물론 M_3 도 MOS의 W/L의 비만 다를 뿐 M_3 과 같은 구조로 이루어져 있다. 이 그림에서 숫자들은 M_2 의 W/L 크기비에 대한 배수에 해당하는 값을 나타낸다. 제어 방법은 $V_1 \sim V_5$ 를 외부에서 접지 또는 V_{DD} 를 가해서 반전기를 동작시키면 M_3, M_4 의 W/L 크기비가 결정된다. 여기에서 보듯이 A의 값은 1~21 변화를 줄 수 있다. 앞에서 보았듯이 V_{out} 에서 다이오드 전압 V_{D2} 는 77K에서 $-2 \sim -2.4mV/K$ 의 음의 온도 계수 값을 가지게 되고, 양의 온도 계수에 해당하는 (5)식의 $\sqrt{AG} \frac{k}{q} \ln 10$ 에서 $G=8$ 로 정하고 A의 값을 약 15~18로 정도로 변화시키면 약 $2 \sim 2.4mV/K$ 의 양의 온도 계수를 얻게 되고 이것은 음의 온도 계수의 값을 상쇄할 수 있으므로 77K에서 V_{out} 이 안정된 전압원이 될 것이라고 예상할 수 있다.

3. 측정 결과

이 회로는 Hynix 0.6 μm standard CMOS공정을 이용하여 제작되었다. 그리고 안정적인 Stirling 냉각기를 사용하여 위의 제작된 회로를 극저온 범위에서 측정하여 그 성능을 확인하였다. 온도는 60K~110K 만큼의 범위에서 측정하였고, 측정 장비의 해상도는 1 μV 이었다. 측

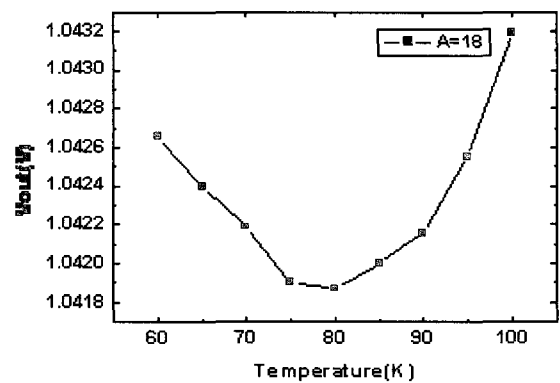
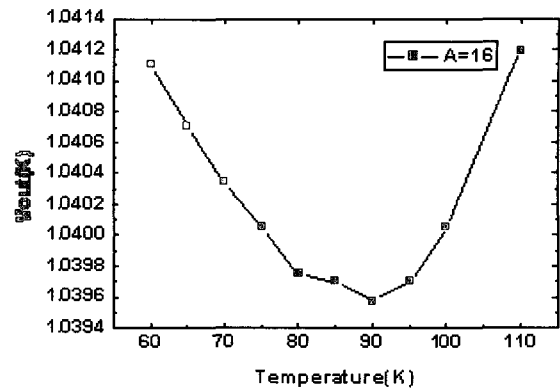


그림 7. 온도에 따른 측정된 출력 전압
Fig. 7. Measured output voltage versus temperature.

표 2. 측정 결과 정리 및 비교
Table 2. Measurement results summary & comparison.

Technology	0.6 μm CMOS
Temperature Coefficient (77K)	20 $\mu V/K$
V_{out} variation (60K to 110K)	1.5mV
supply rejection (300K)	-30dB
Noise density (30kHz)	400nV/ \sqrt{Hz}
Technology	0.5 μm CMOS
V_{out} variation (273 to 343K)	9.4mV
supply rejection (300K)	-45.1dB
Noise density (10kHz)	115nV/ \sqrt{Hz}

정 결과는 그림 7에 나타내었다. A=18,16일 때의 결과를 보여주고 있으며, A=18일 때는 측정온도 60K~100K 범위에서 V_{out} 이 1.0419 \pm 0.0012V의 변화가 있었고, A=16일 때는 측정온도 60K~110K범위에서 V_{out} 이 1.0396 \pm 0.0015V의 변화가 있었다. 그리고 온도범위 77 \pm 3K에서 A=18일 때는 V_{out} 의 온도 계수가 약 20 $\mu V/K$ 이하, A=16일 때는 40 $\mu V/K$ 이하의 결과를 얻었다. 이 결과에서 불

수 있듯이 앞에서 예상했던 A의 값에서 77K 근처의 온도 범위에서 V_{out} 의 온도 계수가 가장 작은값을 얻을 수 있었다. 그리고 앞의 냉각기 문제였던 최대 2K의 온도 변화에 약 $40\mu V$ (A=18일때)이하의 잡음이 생기므로 이것은 적외선 검출기의 잡음인 $300\mu V$ 에 비해서 충분히 작아서 냉각기 시스템이 불안정한 곳에 충분히 대처할 수 있는 결과를 얻었다. 이러한 결과를 표 2에 정리하였다. 표 2는 기존의 회로에서 상온에서의 밴드갭 회로에 대한 특성^[4]을 비교하고 있다. 측정온도 범위와 사용 목적이 다르지만 출력 전압의 변화를 보았을 때 극저온에 대한 회로가 더 우수한 성능임을 알 수 있다.

그리고 다른 측정 결과에서 전원 전압의 변화에 따른 V_{out} 변화 즉 supply voltage rejection이 낮은 주파수에서 -30dB의 값이 측정되었으며, V_{out} 의 잡음 밀도는 300kHz에서 약 $400nV/\sqrt{Hz}$ 의 값이 측정되었다. 이러한 측정 결과는 기존의 회로특성에 비해 좋은 특성은 아니다. 하지만, 이러한 특성들을 중점으로 해서 설계된 것이 아니고, 앞의 온도변화에 따른 V_{out} 의 잡음과 적외선 감지소자의 잡음 $300\mu V$ 을 고려하면 전체 잡음에 비해서 V_{out} 의 잡음이 5% 이내로 충분히 수용할 만한 결과값이 되므로 문제점은 없을 것이다.

IV. 결론 및 추후과제

본 논문은 극저온에서의 온도 변화에도 안정적인 전압을 얻을 수 있는 밴드갭 회로를 선택하여 그 성능을 확인하였다. 각 소자의 저온 특성을 살펴보고 저온에 적합하게 동작조건을 결정한 후 그것을 제안된 회로에 적용하여 그 결과를 보았다. 이를 통해서 광자형 적외선 검출기의 Joule-Thomson 냉각기의 온도 변화에 따른 신호 취득회로의 문제점을 보완할 수 있는 결과를 얻었다. 즉 V_{out} 의 온도계수가 $20\mu V/K$ 의 작은값을 얻었다. 이뿐 아니라 극저온에서 밴드갭 회로의 성능 확인과 적외선 검출기에의 적용은 처음 시도되었고, 앞으로 극저온에서 동작되는 시스템에 응용가능할 것이다. 다만, 부족한 점은 제안된 회로의 노이즈 특성과 supply rejection 특성이 우수하지 못하다. 물론 지금과 같은 적용에서는 큰 문제점이 되지 않지만, 더욱더 일반적인 적용을 위해서는 위의 문제점을 고려한 회로 설계가 이루어지면 더 우수한 성능을 보이는 밴드갭 회로가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Behzad Razavi, "Design of Analog CMOS Integrated Circuits", pp.377~400, 2001.
- [2] Siegfried Selberherr, "MOS Device Modeling at 77K", IEEE Transaction on Electron Devices. VOL. 36. NO. 8. August 1989.
- [3] Hoji Hanamura, Masaaki Aoki, Toshiaki Masuhara, Osamu Minnto, Yoshio Sakai and Tetsuya Hayashida, "Operation of Bulk CMOS Devices at Very Low Temperatures", IEEE Journal of Solid-State Circuits, VOL. sc-21, NO. 3, June 1986.
- [4] Arne E. Buck, Charles L. McDonald, Stephen H. Lewis and T.R. Viswanathan, "A CMOS Bandgap Reference Without Resistors", IEEE Journal of Solid-State Circuits, VOL. 37, NO. 1, January 2002.

저 자 소 개



김 연 규(정회원)
 2002년 경북대학교 전기 및 전자공학부 졸업 (공학사)
 2004년 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학 전공 졸업(공학석사)
 2004년~현재 한국항공우주연구원 지상수신관제그룹

<주관심분야: 적외선 카메라 시스템, 신호취득회로>



강 상 구(학생회원)
 1998년 전남대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 2000년 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학 전공 졸업 (공학석사)
 2000년~현재 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학 전공 박사과정

<주관심분야: 메모리, 신호취득회로>



이 회 철(정회원)
 1978년 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1986년 동경공업대학 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1989년 동경공업대학 전자공학과 졸업 (공학박사)

1989년~현재 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학 전공 교수

<주관심분야: 적외선 소자, 신호취득회로, 메모리 반도체>

