

적외선 검출기를 위한 액체 질소 온도 동작 밴드갭 기준회로의 설계

김연규*

Design of Bandgap Reference Circuit Operating at Liquid Nitrogen Temperature for Infrared Detector

Youn-Kyu Kim*

Abstract

A stable reference voltage generator is necessary to the infrared image signal readout circuit(ROIC) to improve noise characteristics in comparison with signals originated from infrared devices, that is, to gain good images. In this study, bandgap reference circuit operating at cryogenic temperature of 77K for Infrared image ROIC(readout integrated circuit) was propose. Most of bandgap reference circuits which are presented so far operate at room temperature, and they are not suitable for infrared image ROIC operating at liquid nitrogen temperature, 77K. To design bandgap reference circuit operating at cryogenic temperature, the parameter characteristics of used devices as temperature change are seen, and then bandgap reference circuit is proposed with considering such characteristics. It demonstrates practical use possibility through taking measurements and estimations.

초 록

적외선 소자로부터 생성되는 신호와의 비교에 의한 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 기준회로에 대해서 제안하고 있다. 기존에 발표된 대부분의 밴드갭 기준회로는 실온에서 동작하는 것이며, 액체질소 온도 77K에서 동작하는 적외선 영상 ROIC에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 극저온에서 동작하는 밴드갭 기준회로 설계를 위하여, 온도변화에 따른 사용되는 소자들의 parameter에 대한 특성을 살펴본 후, 이러한 특성들을 고려하여 밴드갭 기준 회로를 제안하였으며 이것은 그 실용 가능성을 입증하고 있다.

키워드 : 밴드갭 기준회로(bandgap reference circuit), 액체 질소 온도(liquid nitrogen temperature), 온도계수(temperature coefficient), 적외선 영상신호 취득회로(Infrared ROIC)

* 지상수신관제그룹/ykkim@kari.re.kr

1. 서 론

오늘날 적외선 카메라는 많은 영역에서 요구되어 진다. 예를 들면 천문관측, 해양 관측, 기상학, 지질 특성 관찰, 군사적인 목적, 산불 감시, 비파괴 검사 등의 목적으로 많이 이용되고 있다. 군사적인 목적에서는 미사일의 온도 영상을 감지해서 요격하는 Seeker로서 요즘 많이 연구 되고 있고, 지상에서 군사 작전 시 야간 탐사에 많이 이용되고 있다.

특히 항공우주의 기술에서 가장 많이 이용되고 있는데 이것은 인공위성에 탑재 되어서 여러 분야에 이용되고 있다. 먼저 해양 적외선 사진들은 해양 및 호수의 온도를 원격으로 결정할 수 있어서 즉 이것은 기후 예측을 수행 할 수 있다. 이것은 엘니뇨와 같은 기후 이상을 감지 할 수 있고 지구 온난화의 이해 하는데 중요한 자료가 되고 있다. 그뿐만 아니라 극 지방의 빙산의 이동을 모니터링 할 수 있으며 어류에 대한 정보도 알 수 있다. 다음으로 기상학에서 날씨를 연구하고 예측하는 중요한 자료가 된다. 지구의 날씨를 모니터링하고 주야간 구름의 분포, 온도 그리고 이동을 조사해서 태풍과 같은 재해를 예측 할 수 있다. 그리고 지구 밖의 우주에서 천문적인 현상들을 이해하는데 많은 자료를 제공하고 있으며 요즘은 산불감시와 같은 곳에도 이용된다.

이러한 적외선 검출기는 $0.75\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 의 파장을 갖는 전자파의 복사에 의해서 야기되는 전기적인 신호를 감지하여 영상신호를 얻는 영상센서이다. 이러한 적외선 검출기는 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 하나는 입사되는 광전자들에 의해 여기 되는 전자에 의한 도전율 변화나 광전기력 변화를 가지는 적외선 감지 소자배열(Infrared detector array)이다. 그리고 나머지 하나는 감지 소자에서 발생한 전기적 신호를 읽어내는 신호취득회로(readout integrated circuit)이다. 이 두 부분은 각각 다른 종류의 기관에서 제작되어 hybrid bonding을 통하여 시스템을 이룬다. 그리고 이것은 적외선이 입사되지 않을 때에는 열적으로 생성되는 carrier들의 영향, 즉 열잡음을 없애기 위해서 극저온까지 냉각할 수 있는 냉각 장치를 필요로 하고 있다. 이러한 냉각기를 중에서도 액체 질소를 이용한 Joule-Thomson 냉각기가 많이

사용되고 있다.

그리고, 적외선 영상 신호 취득회로(ROIC) 중에서 일반적으로 사용되는 전압 전달 방식의 ROIC 동작도를 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서 동작 원리는 적외선 감지 소자가 적외선을 받으면 이에 해당하는 광전류가 생성될 것이고 이러한 전류에 해당하는 charge가 처음 C_{int} 에 저장되어 있던 charge(이것은 V_{ref} 와 같은 값이다.)에서 빠져나가 게 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 정확하고 안정적인 전압을 유지해야한다.

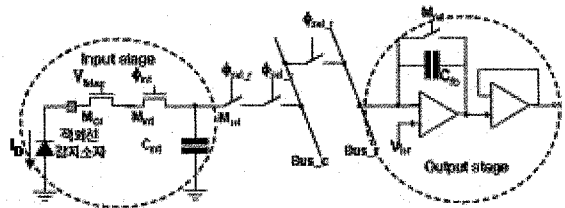


그림 1. 신호처리 회로(ROIC)의 개략도

일반적으로 이러한 V_{ref} 는 외부에서 직접 전원을 가해주는 방식을 쓰는 경우가 많다. 하지만 이러한 방법은 noise coupling문제를 일으킬 수 있으므로 전압 기준회로를 이용하여 V_{ref} 를 만드는 것이 좋은 방법일 것이다.

앞에서 언급했듯이, 적외선 검출기는 열잡음 감소를 위하여 액체 질소를 이용한 Joule-Thomson 극저온 냉각기를 사용하여 77K의 환경에서 동작한다. Joule-Thomson 냉각기는 일반적으로 적외선 탐색기에 많이 사용되는 냉각기인데, 다음 그림 2와 같은 냉각 특성을 가진다. 그림 2는 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 $0.4\text{K} \sim 2\text{K}$ 의 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.

2. 본 론

2.1 극저온에서의 parameter의 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 thermal 전압(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 electric charge이다.

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

회로를 설계하기 앞서 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 알 수 있다. 위의 식(2), (3)을 이용하여 pn 다이오드의 음의 온도 계수식을 구할 수 있다. 이것은 다음 식(4)[1]로 표현할 수 있다.

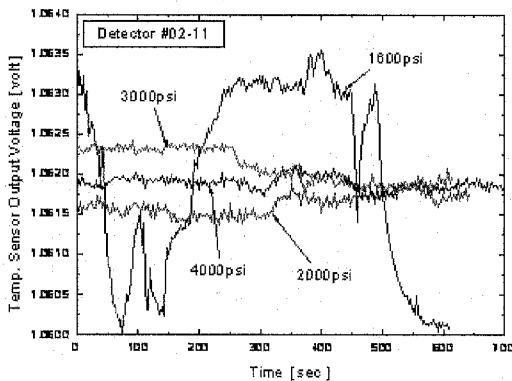


그림 2. Joule-Thomson 냉각기의 시간과 질소가스 압력에 따른 온도 센서 전압
(출처: 국방과학연구소)

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 지금까지 밴드갭 기준 회로는 많이 연구되었지만, 실온에 대해서 온도의 민감도를 줄인 회로들이다. 앞에서 보았듯이, 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 회로를 제시하였으며, 이러한 밴드갭 기준 회로의 설계에 앞서, 77K에서의 소자 parameter의 특성에 대해서 소개하고, 특히 음의 온도 계수를 갖는 전압에 대해서 살펴 볼 것이다. 또한, 이러한 parameter를 고려해서 제안된 회로를 소개할 것이다. 그런 후 제작한 회로의 측정 결과를 토대로 검증할 것이다.

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

여기에서 T 는 절대온도를 나타내며, V_T 는 열전압, E_g 는 Si의 energy bandgap를 나타낸다.

그래서 위의 식 (4)를 이용하여 V_D 의 음의 온도 계수의 값을 계산해보았다. 그리고 실제로 pn 다이오드를 측정하여 음의 온도 계수의 값을 살펴보았다. 이것을 표 1에 나타내었다.

표 1. 음의 온도 계수의 계산과 측정값

	계 산	측 정
실 온	-1.3~-1.5mV/K	-1.4~-1.5mV/K
77K	-2.3mV/K	-2.1~-2.4mV/K

여기에서 볼 수 있듯이 실온과 77K에서는 음의 온도 계수값이 다르다는 것을 알 수 있으며 이것은 결국 실온에서 적용된 밴드갭 기준 회로를 극저온에서는 사용할 수 없으며, 극저온에 적합한 밴드갭 기준 회로가 필요하다. 결과적으로 77K에서 pn 다이오드 전압의 음의 온도 계수값은 약 -2.1~-2.4mV/K의 값을 가진다. 그리고 양의 온도 계수 k/q 는 온도에 따라서 일정한 값을 가지므로 앞의 음의 온도 계수를 상쇄 시킬 수 있는 이득을 곱하면 안정적인 V_{out} 을 얻을 수 있다.

이러한 parameter의 특성뿐만 아니라 mobility, threshold 전압(V_{th})등의 특성도 온도의 함수이므로 이에 대한 고려도 필수적이다. Mobility와 V_{th} 는 온도가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 보통 실온에 비해서 극저온 77K에서는 mobility가 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 것들의 고려를 가지고 회로 설계를 하였다.

2.2 제안된 bandgapreferencecircuit.

앞의 parameter특성들을 고려하여 제안된 bandgap reference circuit을 그림 3에 나타내었다. 먼저 이회로의 동작을 본다면 두 다이오드 D_1, D_2 로 흐르는 전류 차이에 의해서 differential 구조로 되어 있는 M_3, M_4 의 gate 전압의 차이만큼 전류가 M_3 를 통해서 I_3 가 흐른다. 이 전류는 current mirroring에 의해서 M_5 를 통해서 I_3 가 흐르게 된다. M_1 과 M_2 가 M_3 와 M_4 의 W/L 가 A배 만큼 차이가 나므로 M_1 과 M_2 의 gate양단의 전압차이는 $\sqrt{A} \Delta V_D$ 가 된다.[4] V_{out} 은 M_1 의 gate이고, V_{D1} 과 V_{D2} 의 전류의 크기가 10배만큼 차이가 나게 설계하여 이것은 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned}V_{out} &= V_{g2} + \sqrt{A} \Delta V_D \\ &= V_{D2} + \sqrt{A} \frac{kT}{q} \ln 10\end{aligned}\quad (5)$$

여기에서 볼 수 있듯이 음의 온도 계수를 가지는 V_{D2} 와 뒷부분의 양의 온도 계수와 이득의 곱으로 전형적인 bandgap reference의 식으로 이루어져있다.

위의 식은 MOS 전류식을 이용하여 분명하게 확인할 수 있다. $M_1 \sim M_4$ 를 통해서 흐르는 전류를 $I_1 \sim I_4$ 라고 하자. $I_1 \sim I_4$ 의 전류식과 $G_3=I_1, G_4=I_2$ 를 이용하여 다음 식(6), (7)이 된다.

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

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

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

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

식(8)은 앞의 식 (5)가 되는 것을 알 수 있다.

그리고 이 회로의 특징은 외부에서 이득을 조절할 수 있게 하여서 저온에서의 예상외의 parameter변화와 공정상의 오차 등에서 생기는 문제를 해결

할 수 있게 할 수 있다. 이 회로에서는 MOS size A의 값을 control하여 이득을 임의로 바꿀 수 있게 하였다. 그래서 M_3 , M_4 는 다음과 같이 inverter를 이용한 구조로 이루어져 있다. 그림 4는 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 size비에 대한 배수에 해당하는 값을 나타낸다. control 방법은 $V_1 \sim V_5$ 를 외부에서 ground 또는 V_{DD} 를 가해서 inverter를 동작시키면 M_3 , M_4 의 W/L size비가 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.

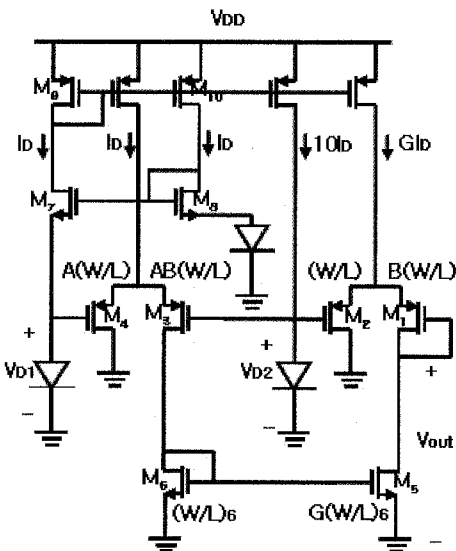


그림 3. 제안된 bandgap reference circuit

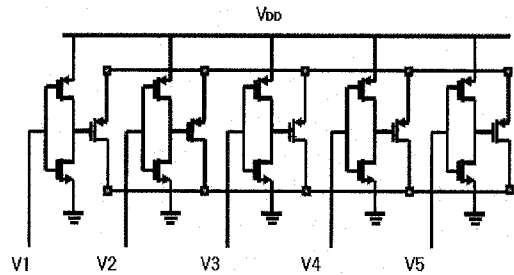


그림 4. Inverter를 이용한 M4의 구조

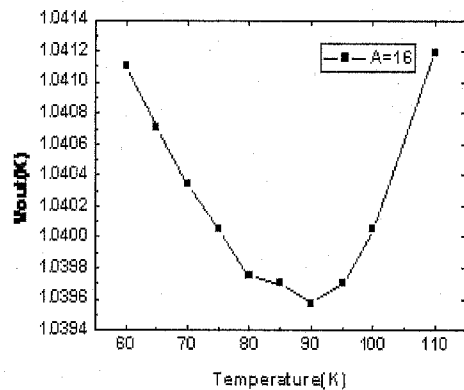
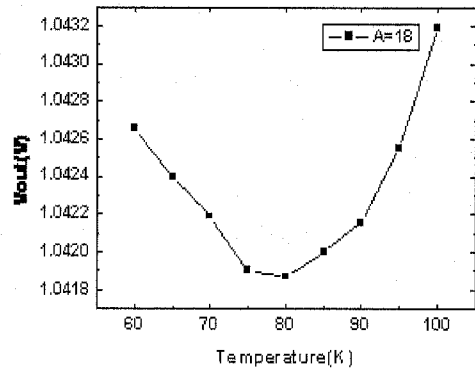


그림 5. 온도에 따른 측정된 output 전압

2.3 측정 결과

이 회로는 보다 안정적인 Stirling 냉각기를 사용하여 측정하였다. 온도는 60K~110K 만큼의 범위에서 측정하였으며, 측정 장비의 resolution은 1uV를 가

진다. 측정 결과는 그림 5에 나타내었다. $A=18,16$ 일 때의 결과를 보여주고 있으며, $A=18$ 일 때는 측정 온도 $60K \sim 100K$ 범위에서 V_{out} 이 $1.0419 \pm 0.0012V$ 의 변화가 있었고, $A=16$ 일 때는 측정 온도 $60K \sim 110K$ 범위에서 V_{out} 이 $1.0396 \pm 0.0015V$ 의 변화가 있었다. 그리고 온도 범위 $77 \pm 3K$ 에서 $A=18$ 일 때는 V_{out} 의 온도 계수가 약 $20\mu V/K$ 이하, $A=16$ 일 때는 $40\mu V/K$ 이하의 결과를 얻었다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 앞에서 예상했던 A 의 값에서 $77K$ 근처의 온도 범위에서 V_{out} 의 온도 계수가 가장 작은 값을 얻을 수 있었다. 그리고 앞의 냉각기 문제였던 최대 $2K$ 의 온도 변화에 약 $40\mu V$ ($A=18$ 일때)이하의 잡음이 생기므로 이것은 적외선 검출기의 잡음인 $300\mu V$ 에 비해서 충분히 작아서 냉각기 시스템이 불안정한 곳에 충분히 대처할 수 있는 결과를 얻었다.

온도변화에 따른 V_{out} 의 잡음과 적외선 감지소자의 잡음 $300\mu V$ 을 고려해서 전체 잡음에 비해서 V_{out} 의 잡음이 5% 이내로 충분히 수용할 만한 결과 값을 얻었다.

3. 결 론

본 논문은 극저온에서의 온도 변화에도 안정적인 전압을 얻을 수 있는 bandgap reference 회로를 제안하였다. 공정상의 오차와 저온에서의 parameter의 변화 등에 따른 문제점을 보완하고자 외부에서 이득을 조절할 수 있는 구조를 제안했으며 이러한 회로를 통해서 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 작은 값을 얻었다. 또한, 극저온에서 밴드갭 기준회로의 설계와 적외선 검출기의 적용은 처음 시도된 것으로 앞으로 극저온용에서 동작되는 모든 회로에도 이 회로를 응용해서 사용할 수 있을 것이다. 그리고 앞으로 인공위성의 탑재체인 적외선 카메라에도 이와 같은 회로를 적용하여 질 좋은 영상을 얻을 것이다.

참 고 문 헌

1. Behzad Razavi, "Design of Analog CMOS Integrated Circuits", 2001, pp.377~400.
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.