

The Performance Modeling of a VGA Bolometer with Self-Aligned Structure

박 승 만[†]
(Seung-Man Park)

Abstract - The performance modeling of a 25 μ m pitch VGA μ -bolometer with the self-aligned thermal resistor structure is carried out. The self-aligned thermal resistor can be utilized for the maximizing the thermal resistance and the fill factor of a bolometer, so the performance improvement can be expected. From the results of the performance modeling of the micro-bolometer with self-align thermal resistor for a 25 μ m pitch 640x480 microbolometer designed with 0.6 μ m minimum feature size, the drastic improvements of NETD from 38.7 mK to 19.1 mK, responsivity of 1.9 times are expected with a self aligned thermal resistor structure. The main reason for the performance improvements with a self-aligned thermal resistor structure comes from the increasement of the thermal resistance.

Key Words : Bolometer Performance Modeling, Self-Aligned Structure, NETD, Responsivity

1. 서 론

볼로미터는 열이 입사하여 볼로미터의 온도가 상승함에 따라 물체의 저항이 변화하고, 이 저항변화로부터 입사한 열을 측정하는 열 센서소자이다^[1,2]. 미소한 입사열을 감지하기 위해서는 볼로미터는 외부와 열적으로 고립구조를 취하여 입사열량의 유출이 최소화 되어야 하고, 흡수된 열량으로 최대의 온도변화를 얻기 위해서는 볼로미터의 열질량이 최소화 되어야 한다^[2]. 마이크로 볼로미터 비냉각 적외선 검출기 기술은 최근 발달한 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술을 활용하여 볼로미터와 외부를 열적으로 고립시켜주는 열저항 구조를 용이하게 형성함으로써 상온에서 적외선 검출이 가능하게 된 획기적인 기술이다. 비냉각 마이크로 볼로미터 검출기 기술은 그 동안 고가이고 운영유지가 어려워 특수한 목적으로만 활용되던 열상장비를 소방, 안전, 보건, 송배전선의 관리 등 산업시설관리에도 그 활용범위가 확대되어 가고 있다.

영상소자로서의 마이크로 볼로미터는 영상의 공간 분해능을 높이기 위하여 볼로미터의 픽셀피치가 50, 30, 25, 17 μ m로 점점 줄어드는 방향으로 발전되고 있다^[3,4]. 픽셀 피치를 줄여가기 위해서는 공정기술 뿐만 아니라 볼로미터 픽셀구조에도 해결해야할 과제들이 많다. 픽셀피치의 감소에 따라 볼로미터에서 발생하는 잡음은 거의 유사하거나 증가하게 되는 반면, 픽셀피치의 감소에 따른 수광면적 감소, 채움인자(fill factor)의 감소, 그리고 열전도(thermal conductance)의 증가로 인한 볼로미터의 신호는 감소하게 되어 결국 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)가 심각하게 줄어든

게 된다. 피치감소에 따른 열전도의 증가와 채움인자의 감소를 해결하기 위한 방안으로 다층구조의 볼로미터 구조가 시도되고 있으나^[2,4], 제작 공정이 복잡하여 용이하게 접근할 수 있는 방법은 아니다. 따라서 공정기술의 큰 변화 없이 픽셀 피치를 줄이는 방법을 연구하는 것은 공학적으로 큰 가치가 있다고 생각된다.

최근 보고된 자기정렬 열저항(self-aligned thermal resistor)을 갖는 볼로미터의 제조 방법은 주어진 공정기술에서 채움인자를 극대화하고 열전도를 최소화 할 수 있다는 장점을 제공한다^[5]. 본 논문에서는 피치가 25 μ m인 볼로미터를 설계 및 구현하고자 할 때 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터에서 도달할 수 있는 볼로미터 파라미터를 모델링하고 자기정렬 구조를 갖는 피치가 25 μ m인 VGA급의 볼로미터의 최종 성능인 등잡음 온도차를 모델링하였다. 여기서 VGA급이란 등잡음온도차를 모델링할 때 사용한 파라미터가 모두 VGA급 볼로미터의 성능 파라미터에 해당된다는 의미이다. 자기정렬구조를 갖는 볼로미터는 주어진 공정으로 최대의 열저항을 달성할 수 있으므로 이를 통해 달성할 수 있는 최대 성능이 어느 정도인지를 예측하는 것이 필요하다. 본 연구는 이런 목적을 위하여 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 성능을 예측하기 위한 모델링을 하였다.

2. 볼로미터의 성능 지수

비냉각 적외선 볼로미터의 성능지수는 등잡음 온도차(noise equivalent temperature difference, NETD), 반응도(responsivity), 등가잡음광파워(noise equivalent power, NEP) 그리고 탐지도(detectivity)가 있다^[2]. NETD는 적외선 영상 시스템이 구분할 수 있는 최소의 온도 차이를 의미하며, 볼로미터가 물체

[†] 교신저자, 정희원 : 호서대학교 국방과학기술학과 부교수 · 공박
E-mail : smanpark@hoseo.edu

접수일자 : 2010년 11월 10일

최종완료 : 2010년 11월 18일

1) VGA는 Video Graphics Array의 약자로 640x480의 화소를 갖는 영상 형식을 의미함.

의 온도를 감지하여 영상화한다는 점을 고려하면 영상 시스템 또는 영상 소자의 성능으로 가장 중요한 성능지수임을 알 수 있다. 반응도는 적외선 검출 신호의 형태에 따라 볼로미터의 출력전압 또는 출력전류와 이 때 입사한 광 파워의 비로 정의된다. 즉 반응도는 단위 광 파워 당의 출력신호의 크기를 의미한다. NEP는 볼로미터 한 픽셀의 SNR이 1일 때의 입사 광 파워를 의미하며, NEP가 작을수록 픽셀의 잡음이 작다는 것을 의미한다. NEP는 볼로미터의 수광면적과 측정 주파수 범위에 관련이 있는 양이다. 탐지도, 정확히 말하여 규격화된 탐지도(normalized detectivity)는 NEP의 역수에 볼로미터의 수광면적과 측정 주파수 범위의 곱의 제곱근을 곱한 값으로 정의되며, NEP가 작은 값으로 갈 때 유리한 방향임을 표시하는 점과 픽셀의 면적과 측정 주파수 폭의 의존성을 규격화 함으로서 서로 다른 수광면적을 갖는 검출기가 서로 다른 측정 주파수 범위에서 측정된 값을 비교하기 위하여 규격화된 탐지도를 도입하였다. 이들 가운데 NETD는 적외선 영상소자 또는 시스템의 온도 분해능을 가장 잘 표현하고 있어 오랫동안 널리 사용되어 오고 있다^[2].

여기서는 볼로미터 검출기의 성능지수로서의 NETD를 살펴보고, 이를 활용하여 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 성능을 모델링하였다. NETD 모델링에서 자주 활용되는 표현은 다음 식으로 주어진다^[2].

$$NETD = \frac{4 \cdot (F/\#)^2 V_N}{R \cdot A_{pp} \cdot \tau_{optics} \cdot [\Delta M / \Delta T]} \quad (1)$$

여기서 $(F/\#)$, A_{pp} , τ_{optics} 는 각각 광학계의 F-수, 볼로미터의 픽셀면적, 광학계의 투과도이고, $[\Delta M / \Delta T]$ 는 온도대조비(temperature contrast)로 정의되는 값으로 8~14 μm 의 적외선에 대하여 2.624 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 의 값을 갖는 상수이다. R 은 볼로미터의 반응도로 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{\epsilon FF a I_B R_{bol}}{G(1 + \omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 ϵ , FF , a , I_B , R_{bol} 그리고 G 는 각각 볼로미터의 적외선 에너지 흡수율, 채움인자, 볼로미터 저항체의 온도계수 (temperature coefficient of resistance), 볼로미터의 bias 전류, 저항 그리고 열전도이다. 또한 ω 는 입사적외선의 각진동수(angular frequency)이고, τ_{th} 은 열 시정수 이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 볼로미터의 반응도는 채움인자와 저항체의 온도계수에 직접적인 비례관계가 있고 열전도에 반비례관계가 있다.

한편, 식 (2)에서 rms(root mean square) 잡음전압 V_N 은 볼로미터의 신호경로 상에서 유입될 수 있는 모든 잡음전압을 포함하는 값이다. 여기서는 시스템에서 오는 잡음은 충분히 작아서 무시할 수 있다고 가정하면, 잡음 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_N^2 = V_{n,J}^2 + V_{n,1/f}^2 + V_{n,ROIC}^2 + V_{n,TF}^2 + V_{n,BF}^2 \quad (3)$$

여기서 $V_{n,J}$, $V_{n,1/f}$, $V_{n,ROIC}$, $V_{n,TF}$, $V_{n,BF}$ 는 각각 볼로미터의 Johnson 잡음, 1/f 잡음, 신호취득회로(readout integrated

circuit, ROIC)의 잡음, 온도요동잡음 그리고, 배경복사요동잡음을 나타낸다. 식 (3)은 시스템 전체잡음이 볼로미터의 영상신호 출력 부분까지에서 발생하는 잡음과 같다는 의미이다. 한편 잡음모델링에 활용한 식은 식 (4)~(7)와 같다^[2].

$$V_{n,1/f} = R_b I_{bias} \sqrt{\frac{K}{v} \ln \left(\frac{f_r}{f_s} \right)} \quad (4)$$

$$V_{n,J} = \sqrt{4k T_1 R_b f_r} \quad (5)$$

$$V_{n,TF} = \frac{R}{\epsilon FF} \sqrt{4k T_1^2 G f_{eff}} \quad (6)$$

$$V_{n,BF} = R \sqrt{8\epsilon \sigma k A_d (T_1^6 + T_1^6)} \quad (7)$$

$$f_{eff} = \min\{f_r, f_{bol}\}$$

$$f_{bol} = \frac{1}{4\tau_{th}}, \quad f_r = x_l \times f_i$$

$$\tau_{th} = \frac{C}{G}$$

위 식에서 사용된 변수들의 이름과 모델링에 사용한 값은 4장에서 표2에 정리하였다.

식 (1), (2)에 의하면 NETD를 모델링하는 것은 결국 볼로미터의 채움인자(FF), 열전도(G), 열 시정수($\tau_{th}=C/G$), 그리고 잡음전압을 모델링하는 것이 된다. 식 (1), (2)에 있는 나머지 파라미터는 시스템에서 결정되거나 볼로미터 설계 시 결정되는 상수이다.

3. 자기 정렬 구조를 갖는 볼로미터

3.1 자기정렬 구조

반도체 공정기술에서 자기정렬 방식의 제조공정은 마스크 정렬 오차를 최소화 할 수 있는 장점을 제공하므로 오랫동안 활용되어 왔다. 이 방법을 마이크로 볼로미터 제조공정에 활용할 경우, 몇 가지 장점을 얻을 수 있다. 우선 볼로미터의 열 저항을 자기정렬 구조로 형성하는 경우에는 열 저항이 차지하는 면적을 최소화 하여 열 저항을 최대로 할 수 있고, 채움인자를 최대화할 수 있어 볼로미터의 성능향상을 가져오는 장점이 있다. 여기서 열 저항이란 볼로미터 멤브레인(membrane)에서 앵커를 연결하는 열적 고립구조를 의미한다. 그림 1에는 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터(위)와 보통의 볼로미터(아래)의 입체모형을 나타내었다. 이 그림의 두 볼로미터는 피치가 25 μm 인 볼로미터를 최소 선폭 0.6 μm 로 설계한 것이다. 적용된 설계 규칙은 자기정렬 구조와 관련된 부분을 제외하고 두 소자에 동일하게 적용하였다. 이 그림에서는 열저항 내의 금속 층을 보일 목적으로 작은 그림에서 볼 수 있는 상부의 질화 실리콘(SiN_x) 박막 등은 나타내지 않았다. 이 그림에서 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터는 그렇지 않은 볼로미터와 비교하여 열 저항의 폭이 줄어들음을 볼 수 있다. 한편 소자의 중간에 위치한 멤브레인 내에 붉은 색으로 표시된 부분은 온도측정용 저항체로 VO_x 이다. 이 부분의 면적을 픽셀 피치면적으로 나눈 값이 픽셀 내의 수광면적을 나타내는 채움인자이다.

그림 2에서는 볼로미터의 단면형상을 관찰하기 위하여 그림 1의 중앙 부분을 따라 잘라낸 단면 형상을 나타내었다. 여기서 왼쪽 그림이 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터이다. 이 그림의

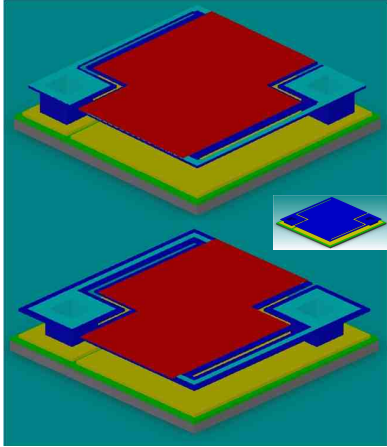


그림 1 25 μm 피치를 갖는 볼로미터 픽셀의 고체모델. 위 그림에서 자기정렬 구조를 갖는 열 저항을 볼 수 있으며, 아래 그림에서는 보통의 볼로미터 열 저항체이다. 가운데 작은 그림은 모든 층이 표기된 그림으로 두 개의 큰 그림에서는 상부의 SiNx 층 등을 나타내지 않은 그림이다.

Fig. 1 The solid models of two bolometers of 25 μm pitch. The above is the model of a bolometer with self-aligned structure. The below is of a normal bolometer. The small figure in the middle shows the upper layers of SiNx etc. those are not shown in the two large models.

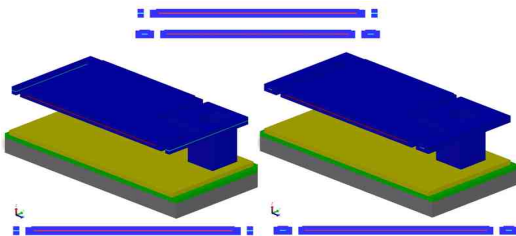


그림 2 볼로미터의 고체모델에서 중간 부분의 단면을 잘라낸 모습(왼쪽 그림이 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터임)과 각 멤브레인의 단면 형상들. 위 부분에는 두 볼로미터의 멤브레인의 단면을 비교하기 위하여 나타난 그림으로 상하방향으로의 스케일은 시각화를 위하여 확대된 것이다.

Fig. 2 The cutting views of two solid models and the cross-sectional views of each membranes. The above is the membrane cross-sectional views for a comparison, the vertical scale is exaggerated for the visual purpose.

위에는 각각의 멤브레인의 단면 형상을 비교하기 위하여 나란히 배열하여 놓았다. 아래의 두 그림 가운데 왼쪽에서 열 저항 부분의 금속(하늘색 부분)이 가장자리를 따라 드러난 모습을 좌우에서 볼 수 있으나, 오른쪽 그림에서는 금속 층이 질화실리콘막으로 싸여 있음을 볼 수 있다. 이 그림의 위 부분에는 두 볼로미터의 멤브레인 단면을 비교하기 위하여 나타난 그림으로 시각적인 효과를 위하여 상하방향으로의 스

케일은 확대된 것이다. 이 부분에서는 양쪽의 열 저항체의 명확한 대조를 볼 수 있으며, 중간에 긴 부분으로 나타낸 부분인 멤브레인으로, 자기정렬 구조에서 픽셀 피치방향으로의 길이가 증가했음을 관찰할 수 있다. 즉 온도측정용 저항체의 면적이 증가하였음을 볼 수 있다. 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터는 열 저항의 폭을 좁게 형성할 수 있으며, 이에 따라서 열 저항의 증가와 채움인자의 증가를 동시에 기대할 수 있다.

3.2 볼로미터의 파라미터 모델링

3.2.1 채움인자

채움인자는 볼로미터 설계 형상에서 찾아낼 수 있다. 볼로미터를 설계하는 데는 주어진 피치, 공정의 최소선폭과 더불어 설계규칙이 필요하다. 여기서는 25 μm 피치의 볼로미터를 0.6 μm 최소선폭을 가정하였으며 설계 규칙은 각 공정 단계별 임계치수(critical dimension, CD)를 스케일 가능한 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor) 공정의 CD를 참조하여 결정하였다^[6].

채움인자는 정의에 의하여 수광면적과 픽셀 피치면적의 비로 계산된다. 따라서 설계규칙을 따라 25 μm 피치의 볼로미터를 설계할 때, 주어진 최소 선폭의 공정기술에 따라 얻을 수 있는 채움인자를 계산할 수 있다. 그림 3은 25 μm 피치의 마이크로 볼로미터에서 공정의 최소 선폭에 따라 채움인자를 계산한 결과이다. 이 그림에서 사각형은 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 채움인자이고, 원은 보통의 볼로미터에서 계산된 채움인자이다. 이 그림에서 우리가 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다. 최소 선폭 0.6 μm 의 공정 기술로 25 μm 피치의 볼로미터를 구현할 경우 일반적인 볼로미터에서 얻을 수 있는 채움인자는 58% 정도이고, 자기정렬 구조로 얻을 수 있는 채움인자는 65% 정도가 된다는 것이다. 여기서 생각할 수 있는 점은 단일층의 볼로미터 구조에서 달성할 수 있는 채움인자는 보통 60% 정도임을 고려할 때, 자기정렬 구조를 채택하면 공정의 최소 선폭에 따라 약 5~7%의 채움인자 증가효과를 기대할 수 있다는 점이다.

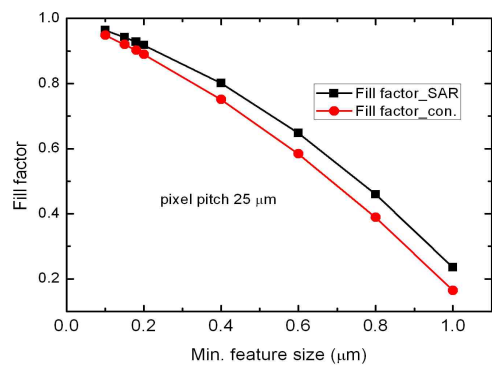


그림 3 공정의 최소 선폭에 따른 25 μm 피치를 갖는 볼로미터에서 채움인자의 계산 결과. 그림에서 사각형은 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터, 원형은 보통의 볼로미터의 채움인자를 표시한다.

Fig. 3 The fill factor calculation results of the two microbolometers with 25 μm pitch. The filled square shows the fill factor of the bolometer with self-aligned structure and the filled circle of the normal bolometer.

3.2.2 열 저항 및 열 시정수의 모델링

자기정렬 구조에 의한 열 저항의 증가 및 열용량 증가를 정량적으로 계산하였다. 우선 열 저항의 증가량을 계산한다. 열 저항체의 열전도(G)는 구성하는 물질의 열전도도와 그 기하학적 형상, 즉 단면적과 길이의 비에 비례한다^[7]. 이 모델을 사용하여 열 저항체의 열전도를 계산한다.

$$G = \sum_j K_j \frac{A_j}{l_j} = \frac{1}{l} \sum_j K_j A_j = \frac{1}{l} \sum_j K_j w_j t_j \quad (8)$$

여기서 K_j , A_j , l_j , w_j , t_j 는 각각 열 저항체를 구성하고 있는 j -번째 물질의 열전도도(thermal conductivity), 단면적, 길이, 폭과 두께를 나타낸다. 식 (8)에서는 길이가 모든 물질에 대하여 동일하다고 가정하였다. 보통 열 저항을 구성하는 재료는 그림 2에서 보는 바와 같이 SiN_x 와 NiCr 등의 금속 박막이다^[3]. 이 경우 (8)식은 SiN_x 층과 NiCr metal 층의 단순한 두 항으로 된다.

먼저, 일반적인 볼로미터에서 열전도(G_{con})를 계산하였다. SiN_x 와 metal로 사용되는 NiCr 의 열전도가 각각 4.5와 11.3 W/(mK) 이고, 그 열 저항체의 폭에서도 SiN_x 가 3배 넓고, 두께에서도 SiN_x 의 두께가 보통 30nm 미만의 NiCr 층의 두께보다 3배 이상 두꺼우므로, 단면적에서도 SiN_x 의 단면적이 약 10배 크다^[3, 8-11]. 즉, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{con} &= \frac{1}{l} (K_{\text{SiN}} W_{\text{SiN}} t_{\text{SiN}} + K_{\text{metal}} W_{\text{metal}} t_{\text{metal}}) \\ G_{con} &= \frac{1}{l} (4.5 \times 3 W_{\text{metal}} \times 3 t_{\text{metal}} + 11.3 \times W_{\text{metal}} t_{\text{metal}}) \\ &= 51.8 \times \frac{W_{\text{metal}} t_{\text{metal}}}{l} \quad (9) \end{aligned}$$

같은 방식으로 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터에서 열전도(G_{SAR})는 위 계산에서 W_{SiN} 만 3배 감소하면 된다. 이를 고려하여 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{SAR} &= \frac{1}{l} (4.5 \times W_{\text{metal}} \times 3 t_{\text{metal}} + 11.3 \times W_{\text{metal}} t_{\text{metal}}) \\ &= 24.8 \times \frac{W_{\text{metal}} t_{\text{metal}}}{l} = 0.48 \times G_{con} \quad (10) \end{aligned}$$

즉, 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 열전도(G_{SAR})는 보통의 열전도(G_{con})보다 2.1배 줄어든다.

적외선 흡수 및 온도 감지층의 열용량 변화를 추정하였다. 먼저, 자기정렬 열 저항을 갖는 볼로미터 층의 열용량(C_{SAR})은 다음과 같이 추정할 수 있다^[2,3].

$$\begin{aligned} C_{SAR} &= \sum_j \rho_j V_j c_j \\ &= \sum_j \rho_j (t_j FF_{SAR} A_{PP}) c_j \\ &= (FF_{SAR} A_{PP}) \sum_j \rho_j t_j c_j \\ &= \frac{FF_{SAR}}{FF_{con}} C_{con} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서 ρ_j , V_j , t_j , c_j 는 각각 j 번째 구성 재료의 밀도, 부피, 두께, 비열이고, A_{pp} 는 볼로미터의 픽셀의 면적이며, FF_{SAR} ,

FF_{con} 과 C_{SAR} , C_{con} 은 각각 자기정렬 열 저항을 갖는 볼로미터와 보통의 열 저항을 갖는 볼로미터의 채움인자와 열용량이다. 식 (10)에 의하면 자기정렬 열 저항을 갖는 볼로미터의 열용량과 보통의 열 저항을 갖는 볼로미터의 열용량의 비는 각각의 채움인자의 비와 같다. 즉 0.6 μm 공정으로 25 μm 의 볼로미터 배열을 구현할 때, 자기정렬 열 저항을 채택할 경우 열용량은 채움인자가 58에서 65%로 증가함에 따라 보통의 열 저항 볼로미터 열용량의 1.12배로 증가하는 것이 기대된다.

지금까지 논의한 열전도와 열용량 모델링으로부터 25 μm 피치의 볼로미터 구현 시 자기정렬 구조의 열 저항을 갖는 볼로미터의 열 시정수는 다음과 같이 증가됨을 기대할 수 있다.

$$\tau_{th, SAR} = \frac{C_{SAR}}{G_{SAR}} = \frac{1.12 \times C_{con}}{G_{con}/2.1} = 2.4 \tau_{th, con} \quad (12)$$

즉, 열 시정수는 2.4배 증가된다.

지금까지 논의한 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 성능 모델링 결과를 요약하면, 25 μm 피치의 볼로미터 구현 시 자기정렬 구조를 채택하면, 채움인자가 1.12배, 열 저항은 2.1배 증가하고, 열용량은 1.12배 만큼 증가하여 열 시정수는 2.4배 증가됨을 기대할 수 있다. 이를 표 1에 정리하였다

표 1 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 파라미터 모델링 결과.
Table 1 The result of the parameter modeling of a bolometer with self-aligned structure.

파라미터	자기정렬 구조의 모델링 결과	증감
채움인자	$FF_{SAR} = 1.12$ FF_{con}	12% 증가
열전도	$G_{SAR} = 0.48$ G_{con}	열저항 2.1배 증가
열용량	$C_{SAR} = 1.12$ C_{con}	12% 증가
열 시정수	$\tau_{SAR} = 2.4$ τ_{con}	2.4배 증가

4. 자기 정렬 구조를 갖는 25 μm 피치의 VGA급 볼로미터의 성능 모델링

4.1 NETD의 모델링

전술한 볼로미터의 파라미터 모델링 결과로부터 이들이 NETD에 미치는 영향을 계산하였다. 식 (1)에 의하면 반응도가 볼로미터와 시스템 파라미터의 함수로 구해져 있으므로, NETD 모델링에서 남은 것은 잡음을 정확히 모델링하는 것이다. 하지만 여기서 우리가 지향하는 점이 자기정렬 구조에 의한 성능 변화의 모델링에 있으므로, 단지 자기정렬 구조에 의한 볼로미터의 파라미터 변화가 잡음성분에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하여 이를 반영해 주면 된다. 여기서는 이미 알려진 잡음모델을 그대로 활용하였고 잡음성분 중 우리가 모델링하려는 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터에서 기여될 수 있는 잡음만을 고려하였다.

문제를 단순히 하기 위하여 단위 픽셀 내의 주 잡음원으로 볼로미터 저항에서 발생하는 1/f 잡음, Johnson 잡음, 열 저항에 의한 멤브레인 층과 하부의 기판사이의 열 교환에 의한 온도요동잡음이 주요한 잡음성분이고, 나머지 잡음원은 성능

에 크게 기여하지 않는다고 가정하자. 이렇게 하여 주요한 잡음원인 볼로미터 소자에서 발생한 잡음에 대하여 자기정렬 구조의 효과를 고려하였고 나머지 잡음은 활용한 잡음모델 값을 그대로 활용할 수 있었다. VO_x 기반의 볼로미터 기술에서 보고되는 주요 잡음성분이 1/f 잡음과 온도요동잡음 이란 점을 고려하면, 이러한 가정은 아주 타당하다^[11,12]. 1/f의 저주파 잡음은 온도 저항체의 부피의 제곱근에 반비례하는 관련이 있으므로, 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터 모델링에서는 이를 고려해주면 된다^[2]. 이렇게 하여 각각의 잡음성분을 계산하였고 이 결과로 다시 볼로미터의 NETD를 계산하였다. 이 계산에 사용된 파라미터를 표 2에 정리하였다.

표 2 NETD 모델링에 사용한 파라미터 값들.

Table 2 The values of parameters using this NETD modeling.

Parameters	symbols	Values of SAR bolometer	Values of normal bolometer	Unit
System Parameters				
F-number of the infrared optics	F/#	1	1	-
Transmission of the infrared optics in the wavelength interval from 8 μm to 14 μm	T_{optics}	1	1	-
Absorption of the bolometer membrane in the wavelength interval from 8 μm to 14 μm	ϵ	0.92	0.92	-
Bolometer membrane temperature	T_1	300	300	K
Bolometer membrane temperature	T_2	300	300	K
image frame rate	f_i	60	60	Hz
Shutter / uniformity correction frequency	f_s	1.66E-02	1.66E-02	Hz
IR modulation frequency	ω	30	30	Hz
the readout frequency/pixel rate	f_r	2.9E+04	2.9E+04	Hz
the thermal integration frequency	f_{bol}	1.02E+01	2.39E+01	Hz
the effective readout frequency	f_{eff}	1.02E+01	2.39E+01	Hz
Bolometer Parameters				
Total thermal conductance	G	1.58571E-08	3.30E-08	W/K
Thermal capacity of the bolometer	C	3.875E-10	3.46E-10	J/K
Thermal time constant of the bolometer	T_{th}	2.44E-02	1.05E-02	s
Bias voltage of the bolometer	V_{bias}	2	2	V
Bolometer pixel area (pixel pitch 25 μm)	A_{pp}	6.25E-10	6.25E-10	m ²
Bolometer fill factor	FF	0.66	0.6	-
# of columns	X_c	640	640	-
# of lines	X_l	480	480	-
Resistance of VOx (bolometer resistance)	R_{bol}	2.60E+04	2.60E+04	Ω
TCR of VOx thermistor material	α	0.02	0.02	1/K
Thickness of the vanadium oxide (VOx)	t_{VOx}	8.00E-08	8.00E-08	m
1/f-noise constant of VOx material	K	4.00E-29	4.00E-29	m ²
Constants				
Boltzmann constant	k	1.38E-23	1.38E-23	J/K
Stefan-Boltzmann constant	σ	5.67E-08	5.67E-08	J/(K ⁴ m ² s)
Temperature contrast in the wavelength interval from 8 μm to 14 μm at a temperature of 300 K	($\Delta M/\Delta T$)	2.624	2.624	W/(Km ²)

4.2 결과 고찰 및 논의

표 3에 NETD 모델링 결과를 정리하였다. 표 3에는 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터에서 상당한 성능 개선이 이루어질 수 있음을 보이고 있다. 반응도가 3.2x10⁵ V/W에서 6.2x10⁵ V/W로 1.9배 증가 하였고, 잡음에서는 총 잡음이 5.06 μV에서 4.84 μV로 4.5% 감소하였으며, 결과적으로 NETD가 38.7 mV에서 19.1 mV로 두 배나 줄었다. 즉 온도분해능이 두 배 향상되는 결과를 가져온다는 것이다. 이러한 개선의 원인이 무엇인지를 살펴보았다.

먼저 반응도의 개선원인을 살펴본다. 반응도에 영향을 주는 요인은 앞서 논의한대로 채움인자와 열전도가 있다. 3장에서 볼로미터의 파라미터 모델링 결과에 의하면 채움인자의 개선은 1.12배이고 열전도의 개선은 2배이다. 따라서 이를 고려하면 반응도에서는 2.2배의 개선 효과가 기대된다. 모델링된 개선결과는 1.9배로 기대치보다 작다. 이 원인은 열 시정수의 변화에서 찾을 수 있다. 표 3에서 보듯이 시정수가 2.4배 증가하여 24.4 ms 나 됨을 알 수 있다.

표 3 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터의 NETD 모델링 결과.

Table 3 The NETD modeling result of a bolometer with self-aligned structure.

	자기정렬 구조의 볼로미터	보통의 볼로미터	단위
채움인자	0.66	0.60	-
열전도	16	33	nW/K
열용량	388	346	pJ/K
열 시정수	24.4	10.5	ms
반응도	6.2x10 ⁵	3.2x10 ⁵	V/W
잡음전압			
$V_{n,1/f}$	4.17	4.38	μV
$V_{n,J}$	1.76	1.76	μV
$V_{n,TF}$	0.91	1.14	μV
$V_{n,ROIC}$	1.43	1.43	μV
V_N (total noise)	4.84	5.06	μV
NETD	19.1	38.7	mK

이 시정수와 모델링에서 사용한 한 화면의 시간(frame time)이 16 ms라는 점을 고려하면 출력 신호는 입사한 적외선에 충분히 반응하여 얻어진 신호가 아니라는 점이다. 즉 볼로미터가 적외선에 충분히 반응하기 전에 신호를 읽어내므로 얻어진 결과이다.

잡음의 개선원인을 살펴보면 표 3에서 보듯이 총 잡음이 5.06 μV에서 4.84 μV로 4.5 % 감소하였으며, 주 감소 원인은 원래의 주 잡음 원이었던 1/f 잡음 전압이 4.5 % 정도 개선되었다. 이 개선은 채움인자의 증가에 따른 볼로미터 저항체로의 부피 증가에서 기인한다. 1/f 잡음 전압은 볼로미터 저항체로의 부피의 제곱근에 반비례한다^[2]. 표 3에서 한 가지 주목할 점은 온도요동잡음성분이 1.14 μV에서 0.91 μV로 감소한 점이다. 이 개선효과는 모두 자기정렬 구조로 만든 열저항이 기여한 것이다. 자기정렬 구조의 볼로미터 모델링에 직접적인 연관이 없는 ROIC 잡음은 활용한 모델에 있던 값으로, 이 모델링에서도 타당한 값으로 판단하여 그대로 사용하였다.

다음으로, NETD의 개선원인을 살펴본다. 표 3에서 보듯이 NETD는 38.7 mV에서 19.1 mV로 두 배나 개선되었다. 이 개선은 반응도에서 1.9 배, 잡음전압에서 4.5 %의 개선효과에 기인하는 것으로 생각된다. 즉 신호에서 1.9 배가 개선되고 잡음에서 4.5 % 개선되면 신호 대 잡음비에서 두 배가 개선되기 때문이다.

지금까지의 고찰을 종합하면 0.6 μm의 최소 선폭을 갖는 공정기술로 25 μm의 픽셀피치의 마이크로 볼로미터 검출기를 구현할 때, 자기정렬 구조의 열 저항을 채택함에 따라 광반응도와 등잡음온도차의 개선은 각각 3.2x10⁵ V/W에서 6.2x10⁵ V/W로 1.9배 와 38.7 mV에서 19.1 mV로 두 배나 개선될 수 있다. 이 개선의 주요한 원인은 열저항 증가에 따른 반응도의 개선에서 연유한다.

5. 결 론

성능 모델링을 통하여 살펴본 것을 요약하면 다음과 같다. 0.6 μm의 최소 선폭을 갖는 공정기술로 25 μm의 픽셀

피치의 640x480의 마이크로 볼로미터 검출기를 구현할 때, 자기정렬 구조를 갖는 열 저항을 채택함에 따라 채움인자가 1.12배, 열 저항은 2.1배 증가하고, 열용량은 1.12배 만큼 증가하여 열 시정수는 2.4배 증가될 것으로 기대되며, 볼로미터의 성능지수로써는 광반응도는 1.9 배 증가하고 NETD는 38.7 mV에서 19.1 mV로 두 배나 개선될 수 있음을 볼로미터의 성능 모델링으로 보였다. 자기정렬 구조를 갖는 볼로미터에서의 성능 개선의 주요한 원인은 열 저항이 2배로 증가하는 데 기인한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술 연구비 지원을 받아 수행된 연구임. (2009-0080)

참 고 문 헌

- [1] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*, Wiley, New York pp. 395-414, 1996.
- [2] F. Niklaus C. Jansson, A. Decharat, J. Källhammer, H. Pettersson and G. Stemme, "Uncooled Infrared Bolometer Arrays Operating in a Low to Medium Vacuum Atmosphere: Performance Model and Tradeoffs", *Proc. of SPIE* 6542, pp. 65421M-1-12, 2007.
- [3] M. Almasri, B. Xu and J. Castracane, "Amorphous silicon two-color microbolometer for uncooled IR detection", *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 293-300, 2006.
- [4] D. Murphy, M. Ray, J. Wyles, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon, K. Almada, T. Sessler, S. Baur, D. Van Lue and S. Black, "640 x 512 17 μm Microbolometer FPA and Sensor Development", *Proc. of SPIE* 6542, pp. 65421Z-1-10, 2007.
- [5] S. Park, S. Han, C. H. Chun and C. S. Han, "Performance enhancement of μ -bolometer by increasing fill Factor" *Proc. of SPIE*, vol. 7660, pp. 766013-1-6, 2010.
- [6] N. H. E. Weste and K. Eshranhian, *Principles of CMS VLSI Design*, 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, New York pp. 142-156, 1993.
- [7] R. A. Wood, "Monolithic Silicon Microbolometer Arrays," in *Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems*, P. Kruse and D. Skatrud, Editors, Semiconductors and Semimetals, Academic Press, New York pp. 43-121, 1997.
- [8] R. A. Wood, C. J. Han, and P. W. Kruse, "Integrated Uncooled Infrared Detector imaging Array" *IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, pp.132-135, 1992.
- [9] D. Murphy, W. Radford, M. Ray, S. Propst, A Kennedy, J. Kojiro, J. Woolaway, K. Soch, R. Coda, G. Lung, E. Moody, D. Gleichman, and S. Baur, "320x 240 silicon microbolometer uncooled IRFPAs with on-chip offset correction", *Proc. of SPIE*, vol. 2746, pp. 82-92, 1996.
- [10] P. Eriksson, Jan Y. Anderson and G. Stemme, "Thermal Characterization of Surface-Micromachined Silicon Nitride Membranes for Thermal Infrared Detectors", *J. MEMS*, vol. 6, no. 1, pp. 55-61, March 1997.
- [11] P. W. Kruse, "Can the 300K radiating background noise limit be attained by uncooled thermal imagers?", *Proc. of SPIE*, vol. 5406, pp. 437-446, 2004.
- [12] R. A. Richwine, Y. R. Puri, A. K. Sood, R. S. Balcerak, S. Horn, G. Baker and M. Wilson, "Microbolometer Sensor Model for Performance Predictions and Real-Time Image Generation of Infrared Scenes and Targets, *Proc. of SPIE*, vol. 7055, pp. 7055T-1-11, 2008.

저 자 소 개



박 승 만 (朴 勝 萬)

1960년 5월 20일생. 1984년 한양대 물리학과 졸업, 1986년 동 대학원 졸업(석사), 1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(박사), 1987~2008.10 국방과학연구소 (연구원, 선임연구원, 책임연구원), 2008.11~현재 호서대 국방과학기술학과 부교수.

Tel : 041-540-9682

Fax : 041-540-9548

E-mail : smanpark@hoseo.edu