

전송선 이론에 의한 적외선 흡수 구조체의 흡수율 모의시험

Modeling and simulation on an IR absorbing structure with the cascaded transmission line model

박 승 만*
(Seung-man Park)

Abstract - In this paper, the modeling and simulation of infrared absorption in an infrared absorbing structure with the cascaded transmission line model were carried out. Each layer in the infrared absorbing structure can be modeled as a characteristic impedance of the cascaded transmission line model. The simulation results show that the cavity thickness to get a maximum absorption should be less than a quarter wavelength, which is somewhat different from prevalent thickness. It can be assured that the sheet resistance of an absorbing layer to get a maximum absorption is $377\Omega/\square$, that the thickness of the absorbing layer dose not affect the spectral characteristics of absorption. It is also shown that the thickness of the active layer is not critical to the IR absorption. It can also be assured that the validation of this modeling is proved in comparison with the previous results from similar absorbing structures.

Key Words : IR absorption, Cascaded transmission line, Characteristic impedance, Quarter wavelength cavity

1. 서 론

최근의 나노기술의 발전과 함께 메타물질의 출현으로 전자파의 활용영역이 확장되고 있다. 다양한 메타물질의 구현으로 물질의 유전율과 투자율을 조절할 수 있으므로 광 또는 전자파를 활용하는 분야에서는 전에 없던 새로운 활용 가능 분야들이 나타나고 있다[1-4]. 메타물질의 활용이 가장 활발하게 연구되고 있는 분야 중 하나는 광 또는 전자파의 반사, 흡수, 굴절에 관련된 전파 분야이다. 새로운 흡수구조가 효율적으로 활용할 수 있는 분야중 하나가 적외선 검출소자 분야이다. 적외선 검출소자는 광원에서 방출되는 아주 작은 에너지를 검출해야하기 때문에 입사되는 전자파의 효율적인 흡수가 매우 중요하기 때문이다[5-8].

적외선 검출소자에서 적외선 흡수구조는 크게 두 가지로 구분된다. 그 첫 번째는 비반사막(anti-reflection layer)을 형성하여 적외선을 잘 흡수하게 하는 것으로 적외선이 흡수될 반도체 소자위에 단층 또는 다층으로 유전체 박막을 형성하여 반사를 줄이는 기술이며 이 기술은 다양하게 연구되어 왔으며 양자형의 적외선 검출기 제조에 거의 모두 적용되고 있다[5-8]. 또 다른 한 흡수구조는 적외선을 흡수하여 그 온도가 변화하는 구조로 흡수층이 $\lambda/4$ 공명 층(quarter wave resonant cavity)의 상단에 위치한 구조이다. 흡수층으로 얇은 금속층, 금속 또는 탄소-블랙(metal or carbon black), 그리고 나노구조를 갖는 메타물질 등이 많이 연구되고 있다[4,5]. 이 방법은 비냉각 마이크로 볼로미터 적외선 검출소자에서 활용되는 구조로 흡수된 열량이 외부로 유출되지 않도

록 적외선 구조체를 외부로부터 열적으로 고립시키는 구조가 요구되며 또한 입사 적외선으로부터 높은 온도변화를 유발하기위하여 흡수구조의 열용량을 최소로 하여야한다[4-9]. 따라서 비냉각 적외선 검출소자를 위한 흡수구조체는 적외선 흡수가 우수하여야하는 것은 물론 열용량이 매우 작게 구현될 수 있어야한다.

전송선 이론에 의하면 표피 깊이(skin depth)보다 훨씬 얇은 두께의 금속박막은 보통 전자파의 투과에 거의 영향을 미치지 않아야한다. 즉 금속 층이 매우 얇아서 전자파의 흡수가 없어야한다. 그러나 실험적 관찰에 의하면 표피 깊이보다 훨씬 얇은 두께에서도 초고주파에서 매우 큰 흡수가 발생하여 전자파 투과율에 심각한 영향을 미치고 또한 이런 현상을 이론적으로 명확하게 설명한 것은 비교적 최근의 일이다[4,10-12]. 이후로 적외선 흡수구조체에 사용되는 얇은 금속층의 역할을 재조명하기 시작하여 파장영역에 따라 두께와 흡수율의 상관관계를 이론적으로 파악하였다[4,5].

본 연구에서는 표피깊이보다 매우 얇은 금속박막을 흡수층로 갖는 적외선 흡수구조에서의 적외선 흡수 과정을 연속된 전송선 이론(cascaded transmission line, CTL)과 얇은 금속층의 흡수이론으로 모델링하고 모의실험을 통하여 흡수율을 구하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 적외선 흡수구조체는 적외선 마이크로 볼로미터 초점면 배열의 단위소자에서 사용되는 흡수체 구조의 한 예이며 이런 특정한 흡수구조에 대하여 적외선 흡수과정을 모델링하여 모의시험으로 흡수체의 설계변수들 사이의 상관관계를 파악할 수 있도록 하는 점은 기술적으로 중요할 뿐 아니라 학문적으로도 매우 흥미로운 일이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 적외선 흡수구조체의 구조에서 모델링에 필요한 부분을 살펴보고 이를 전송선이론으로 모델링하는 과정을 살펴본다. 이 모델링과정을 통해 구조체의 각각의 층을 대표하여 나타내는 모델과

* Corresponding Author : Dept. of Defence Science & Technology, Hoseo University, Korea
E-mail : smanpark@hoseo.edu

Received : October 13, 2013; Accepted : November 28, 2013

라미터인 특성 임피던스를 구하였다. 다음 절에서는 특성 임피던스를 활용하여 구조체의 두께에 따른 흡수율의 변화를 모의 시험한 결과를 살펴봄에 논의하였다. 모의 시험 결과를 앞서 보고된 유사구조의 실험자료 또는 모의 시험 결과와 비교 분석함으로써 본 논문의 타당성을 확인하였다. 본 연구 결과가 새로운 형식의 비냉각 적외선 검출기 설계시 그 흡수층의 구조를 설계하고 검증하는데 활용될 수 있으며, 앞으로 다양한 적외선 흡수구조에 대한 연구에도 확장 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 적외선 흡수구조체 및 CTL 모델

그림 1은 본 연구에서 사용할 마이크로 볼로미터의 적외선 흡수 구조체이다. 이 구조체는, 적외선 입사 방향 순으로, 얇은 금속막막의 흡수층(absorber layer)이 있고, 구조물의 지지와 활성층의 보호를 담당하는 구조층(structural layer)이 온도변화를 감지하는 활성층(active layer)을 감싸고 있으며, 그 아래로 빈 공간(cavity)을 두고 금속반사층(reflector)이 있어 cavity로 $\lambda/4$ 공명층을 형성하고 있다[4-9]. 이 구조에 대한 CTL 모델은 그림 2(a)와 같이 각각 층의 특성 임피던스(characteristic impedance)로 표현할 수 있다[13, 14]. 여기서 특기할 점으로, 흡수층의 두께가 표피깊이 보다 매우 얇은 금속층으로 구성된 흡수층은 금속층의 표면 저항으로 그 층을 모델링해야 흡수율을 기술할 수 있다[9-11]. 따라서 이 흡수층을 전송선 모델에서 병렬저항 R_{abs} 로 모델링하였다.

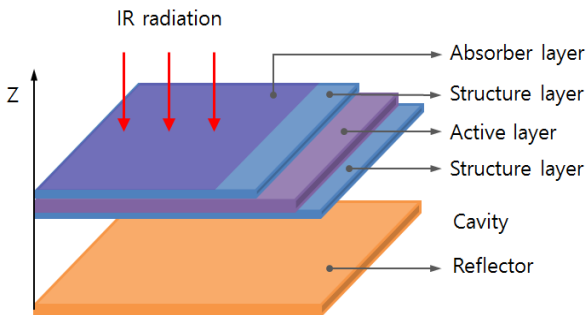


그림 1 적외선 흡수구조체의 형상과 각 층의 명칭
Fig. 1 The shape of an IR absorbing structure and name of each layer

CTL 모델에서 i 층의 특성 임피던스 Z_i 는 다음과 같이 구할 수 있다[11,12].

$$Z_i = \frac{j\omega\mu}{\gamma_i} \tag{1}$$

여기서 j , ω , μ 는 각각 허수, 입사 적외선의 각주파수, 매질의 투자율을 나타내고, γ_i 는 복소수로 표현되는 전파상수(complex propagation constant)를 나타낸다. 그림 2의 CTL 모델에 사용된 각 층에 대한 전파상수는 금속 박막인 흡수층과 반사층은 도체(good conductor)로, 구조층은 손실이 없는 유전체(lossless dielectric)로, 저항체인 활성층(active layer)

은 손실이 있는 매질(lossy medium)로 모델링하였다. 각각의 매질에 대한 전파상수는 다음과 같이 표현된다[13, 14].

$$\gamma_{good_conductor} = (1+j)\sqrt{\omega\mu\sigma/2} \tag{2}$$

$$\gamma_{lossless} = j\omega\sqrt{\epsilon\mu} \tag{3}$$

$$\gamma_{lossy} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}\sqrt{1-j\tan\delta} \tag{4}$$

여기서 σ, ϵ 은 각각 매질의 전기전도도 및 유전율이며 ϵ' 과 $\tan\delta$ 은 유전율의 허수부와 tangent loss를 나타낸다.

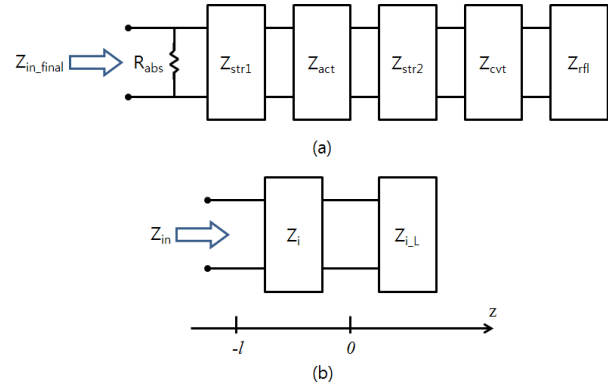


그림 2 흡수구조의 CTL모델(a)과 각 층의 입력 임피던스(b)
Fig. 2 CTL model of an IR absorbing structure(a) and input impedance of each layer(b)

그림 2(b)에서 부하 임피던스 Z_{iL} 을 갖는 i 층의 입력 임피던스, $Z_{i,in}$ 는 적외선이 i 층을 입사할 때 겪는 임피던스로 다음과 같이 구할 수 있으며 이는 $i-1$ 층의 부하 임피던스가 된다[13,14].

$$Z_{i,in} = Z_i \frac{Z_{iL} + jZ_i \tan\beta l}{Z_i + jZ_{iL} \tan\beta l} \tag{5}$$

여기서 l 은 i -번째 층의 두께이다. 또한 이 그림에서 i -번째 매질에서 그 부하로 적외선이 전파할 때 반사되는 적외선의 반사계수, Γ_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_i = \frac{Z_{iL} - Z_i}{Z_{iL} + Z_i} \tag{6}$$

따라서 최종적인 적외선 흡수 구조체의 입력 임피던스, Z_{in} 과 진공중에서 흡수층으로 입사하는 적외선의 반사계수, Γ_{tot} 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{in} = R_{abs} // Z_{in_str1} \tag{7}$$

$$\Gamma_{tot} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{8}$$

여기서 Z_0 는 자유공간의 특성임피던스로 377 Ω 을 나타낸다. 흡수구조체가 반사층을 가지고 있으므로 구조체를 투과

하는 적외선은 없다. 따라서 입사 적외선은 구조체에서 반사되거나 흡수되므로 흡수율은 입력 적외선과 흡수된 적외선의 파워비로 다음과 같이 구할 수 있다[5,9,13].

$$P_{abs} = (1 - |\Gamma_{tot}|^2) P_{in} \quad (9)$$

$$P_{abs}/P_{in} = (1 - |\Gamma_{tot}|^2) \quad (10)$$

모의실험은 MS사의 Excel을 사용하여 수행되었다. 진공에서 적외선 파장이 1~15 μm 범위에서 0.1 μm 간격으로 해당하는 각주파수를 계산한 후 이를 기준으로 각 층의 특성 임피던스를 구하고, 각층에서 입력 임피던스와 반사계수를 구하였다. 매질의 전파상수를 나타낸 식 (2)~(4)를 활용하려면 박막재료의 유전율, 투자율 그리고 전기전도도를 알아야 한다. 본 연구에서는 볼로미터 활성층으로 VOx를, 구조체로 SiNx 박막을, 구조의 처음과 마지막인 흡수층과 반사층의 금속으로는 금(Au) 박막을 사용하였으며, 이들의 물성은 표 1에 정리하였다[15,16]. 굴절율과 유전율과의 관계로부터 유전율은 모두 굴절율에서 구하여 사용하였다[17]. 특히 복소수로 표현되는 금속(Au)의 유전율은 색 분산(chromatic dispersion)을 고려하여 참고문헌에 있는 1~10 μm 범위에서의 복소 굴절율을 curve fitting하여 구한 식을 15 μm 범위까지 외삽하여 유전율을 구하여 사용하였다. 한편 물질의 비투자율은 비자성 물질이므로 모두 1로 하였다. 또한 활성층의 박막인 VOx의 유전율은 Svitashева 등이 보고한 자료를 활용하였다[18].

표 1 적외선 흡수구조체의 각 층의 굴절율과 전기전도도
Table 1 The refractive index and electrical conductivity of each layer in the IR absorber structure

Layer	Material	Refractive index (at RT)(주1)	Electrical conductivity (at RT) (s/m)	ref.
Absorber Reflector	Au	$n(x)=A\lambda^2+B\lambda+C$ $k(x)=A1\lambda^2+B1\lambda+C1$ (주2)	4.089×10^7	15
Structural	SiNx	$n(\lambda)=1+2.8939\lambda^2/(\lambda^2-0.13967^2)$, $k(x)=0$	0	16
Active	VOx	$n=2.1, k=0.32$	2.326×10^2	17
Cavity	Vacuum	1	-	

주1) 파장(λ)에 따른 굴절율에서 유전율을 구하여 사용함.

파장의 단위는 μm .

주2) $A=0.09619, B=0.31122, C=-0.15934, A1=-0.12021, B=6.8028, C=-0.46367, 15 \mu\text{m}$ 까지 외삽

3. 모의실험 결과 및 논의

모의 실험한 파장영역에서 파장에 따른 각 층에서의 흡수율과 최종적으로 흡수구조체 전체의 흡수율이 어떻게 되는가는 무엇보다 큰 관심사이다. 그림 3은 파장에 따른 모의 실험결과로 얻어진 흡수율을 보이고 있다. 모의 실험은 구조층의 두께가 활성층의 위와 아래 모두 200nm, 활성층의 두께가 300nm이고 흡수층의 두께는 면저항이 377 Ω/\square 이 되는 금속 박막의 두께, 650nm이며 cavity 두께는 1.8 μm 일 경

우이다. 이 그림에서 관찰 할 수 있듯이 흡수율이 최대가 되는 파장은 9.8 μm 임을 볼 수 있으며, 이는 본 모의실험에 사용한 적외선 흡수구조체가 10 μm 파장대에서 최대가 되도록 설계된 구조체임을 확인시켜주는 것이다. 또한 이는 본 연구의 모델링이 타당함을 반증하는 것이기도 하다. 또 한 가지 관찰할 수 있는 점은 흡수체 이외에 다른 박막층에서 흡수가 거의 일어나지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 본 모의실험에서 손실이 있는 매질로 모델링한 저항체인 활성층에서도 거의 흡수가 일어나지 않고 있음을 볼 수 있다. 즉 10 μm 파장대의 적외선이 거의 모두 흡수층에서 흡수되고 있음을 보이고 있다.

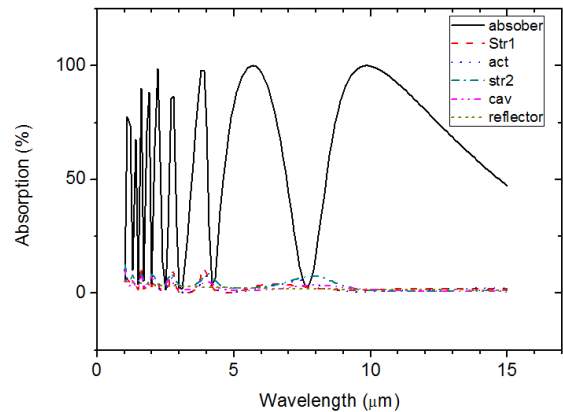


그림 3 흡수구조체 내부의 각 박막 층에서의 파장에 따른 흡수율

Fig. 3 The spectral absorption of each layer in the absorbing structure

그림 4에는 cavity 두께 변화에 따른 흡수율을 보이고 있다. 이 그림은 구조층의 두께가 활성층의 위와 아래 모두 200nm, 활성층의 두께가 300nm이고 흡수층의 두께는 면저항이 377 Ω/\square 이 되는 금속 박막의 두께일 때 cavity 두께를 1.5~2.5 μm 까지 변화시키면서 흡수율을 구하여 그린 것이다. 이 그림에서 보듯이 cavity 두께가 1.9~2.0 μm 에서 흡수가 최대 흡수가 일어남을 알 수 있으며 2.5 μm 일 때 오히려 현저히 떨어짐을 보이고 있다. 이는 마이크로 볼로미터 구조에서 cavity의 두께가 $\lambda/4$ 로 되어 2.5 μm 가 된다고 알려진 것과는 다소 차이가 있다[6,7]. 하지만 그림 1에서 구조를 자세히 살펴보면 반사층과 흡수층 사이의 거리가 2.5 μm 가 되려면 cavity 만의 두께는 1.8 μm 가 되어야한다는 것을 알 수 있다. 즉 반사층에서 흡수층까지의 두께는 cavity 두께와 구조층과 활성층의 두께를 더하면 2.5 μm 가 된다는 점을 확인할 수 있다.

Cole 등에 의하면, 8~14 μm 의 적외선 영역에서 cavity의 두께에 따른 흡수율의 실험적 연구에서 그 두께가 1.5~2.0 μm 사이에서 적외선의 흡수가 최대로 일어나며 그 값은 90%가 넘는다고 한다[19]. 이 결과는 본 모의 실험의 결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

그림 5에는 흡수층의 두께 변화에 따른 흡수율을 보이고 있다. 이 그림은 구조층의 두께가 활성층의 위와 아래에서 모두 200nm이고 활성층의 두께가 300nm이며 cavity 두께가

1.8 μm 일 때 흡수층의 두께를 변화시키면서 흡수율을 계산하여 그린 것이다. 이 그림에서 두께는 흡수층의 면저항이 377 Ω/\square 이 되는 금속 박막의 두께로 규격화한 것이다. 금의 경우 이 두께는 10 μm 적외선에 대하여 650pm이다. 흡수층의 면저항은 두께에 반비례하므로 두께가 늘어나는 방향은 면저항이 감소하는 방향이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 최대 흡수가 일어나는 흡수층의 두께는 1일 때로 이때의 면저항이 바로 진공의 임피던스와 같을 때임을 알 수 있다. 이 모의실험에서 알아낸 흥미로운 사실은 흡수층의 두께 또는 면저항은 적외선 흡수율의 파장 의존성에 영향을 미치지 않는다는 것이다. 즉 흡수층의 두께는 면저항의 변화만 가져올 뿐이며 흡수율의 파장 의존성에 무관하며 금속 흡수층의 두께가 증가할수록 오히려 반사량이 증가한다는 점이다.

최대 흡수를 위하여 흡수층의 면저항이 377 Ω/\square 이 되어야한다는 점은 여러 연구결과에서 찾아볼 수 있다 [4,5,12,20,21]. 이 결과에서 볼 때 본 연구의 모델링이 타당함을 반증하는 것으로 생각할 할 수 있다.

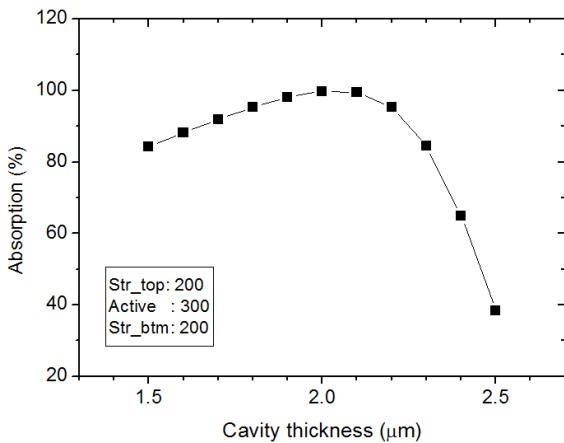


그림 4 흡수 구조체에서 cavity 두께변화에 따른 흡수율
Fig. 4 IR absorption as a function of the cavity thickness

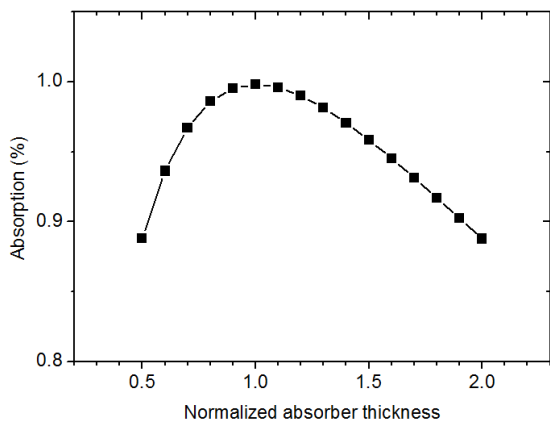


그림 5 흡수층의 두께 변화에 따른 적외선 흡수율, 두께는 흡수층의 면저항이 377 Ω/\square 인 금속 박막의 두께로 규격화 함
Fig. 5 IR absorption as a function of the normalized thickness of absorption layer with the thickness of making sheet of 377 Ω/\square

그림 6에는 흡수구조체의 활성층인 볼로미터 저항체의 두께 변화에 따른 흡수율을 모의 실험한 것이다. 이 모의실험의 조건은 구조층의 두께가 활성층의 위와 아래 모두 200nm이고 cavity 두께가 1.8 μm 이며, 흡수층의 두께가 그 면저항이 377 Ω/\square 이 되는 금속 박막의 두께일 때 활성층의 두께를 변화시키면서 모의 실험한 결과이다. 이 층은 손실이 있는 매질로 모델링되었고 이층의 두께에 따라 특성 임피던스가 크게 변화하므로 이 층의 두께에 따라 흡수율이 변화할 것이라고 기대할 수 있다. 이 그림에서 살펴볼 수 있듯이 흡수율이 최대인 두께는 300~350nm일 때임을 볼 수 있으며 두께가 100~500nm 범위에서의 흡수율도 기대와는 달리 크게 변화하지 않는 것을 볼 수 있다. 이렇게 되는 원인은 active 층의 두께가 표피깊이 보다 매우 작아서 흡수가 매우 작게 발생하기 때문으로 해석된다. 파장이 10 μm 인 적외선의 활성층에서 표피깊이는 6 μm 정도가 됨을 고려하면 본 모의 실험에서 고려하는 활성층의 두께 범위에서는 활성층의 두께가 흡수율에 크게 영향을 미치지 않는다고 이해된다. 그림 6의 모의실험결과에서 볼 때 활성층의 두께가 300nm 좌우 영역에서 흡수율이 떨어지는 점은 두께변화에 따라 반사층과 흡수층 사이의 거리가 공명흡수 파장인 $\lambda/4$ 에서 벗어나면서 발생하는 것으로 해석된다.

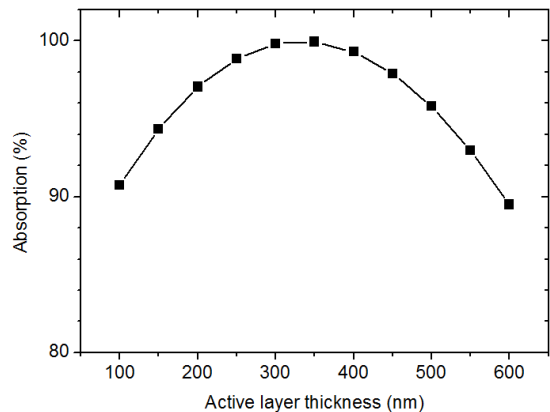


그림 6 흡수구조체에서 활성층의 두께에 따른 적외선 흡수율
Fig. 6 IR absorption as a function of the active layer thickness

보고에 의하면 8-14 μm 의 적외선용으로 VOx를 저항체로 사용하는 비냉각 마이크로 볼로미터에서 저항체의 두께는 200~2000 \AA 범위에서 원하는 저항의 온도계수(temperature coefficient of resistance)에 따라 최대 흡수율은 다소 달라질 수 있다고 보고하고 있다[21-23]. 즉 두께의 범위가 상당히 넓은 범위를 관찰할 수 있다. 이로부터 유추하면 활성층의 두께는 마이크로 볼로미터의 성능에 크게 의존하지 않는 것으로 볼 수 있고 이는 다시 흡수율에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 추측할 수 있다.

4. 결 론

매우 얇은 두께의 금속 흡수층을 갖는 적외선 흡수구조체를 CTL과 얇은 금속의 흡수이론으로 모델링하여 적외선 흡

수과정을 모의실험하고 그 결과를 분석하였으며 또한 기존의 유사구조에서 보고된 결과와 비교하여 분석하여 본 연구의 모델링이 타당함을 보였다.

매우 얇은 금속 흡수층에서 적외선이 흡수되는 것을 전송선에서 병렬저항으로 모델링하고 적외선 흡수 구조체의 각 구성 물질 층을 CTL의 특성임피던스로 모사할 수 있었으며 이를 활용한 모의실험을 통하여 흡수구조체의 파장에 따른 흡수율을 구할 수 있었다. 또한 이 모델을 사용한 모의실험으로 흡수구조체 내부의 박막 두께를 변화시키며 설계변수가 흡수율에 미치는 영향을 살펴볼 수 있었다. 이 흡수구조체의 모델을 사용한 모의실험 결과로부터 공진 cavity의 두께가 공명흡수 파장의 $\lambda/4$ 보다 더 작게 된다는 점을 이론적으로 보였으며, 흡수층의 면저항이 자유공간의 임피던스와 같게 $377\Omega/\square$ 이 되도록 두께를 조절하면 최대의 적외선 흡수율을 달성할 수 있음을 이론적으로 보였다. 흡수층의 두께는 흡수율의 파장의존성에 무관하며 단지 두꺼울 경우 반사율이 증가하여 흡수를 방해하는 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 또한 활성층인 저항체의 두께는 흡수율에 민감하게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 나노기술과 함께 발전할 메타물질로 구성되는 다양한 전자파의 흡수 및 반사 구조체의 모의실험에 활용될 수 있으며 적외선을 포함한 초고주파, 테라헤르쯔파 영역에서도 전자파의 반사 및 흡수율 모의실험을 수행하는데 확장 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] J. Hao, J. Wang, X. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, "High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial," *Appl. Phys. Lett.* 96, 251104, 2010.
 [2] D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire, "Metamaterials and negative refractive index," *Science*, 305, 5685, 788-792, 2004.
 [3] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 - 4187, 2000.
 [4] J. J. Talghader, A. S. Gawarikar and R. P. Shea, "Spectral selectivity in infrared thermal detection," *Light: Science & Applications*, 1, e24, pp1-11, 2012.
 [5] Hoo Kim, and D. P. Neikirk, "Three dimensional dual-band stacked microbolometer design using resistive dipoles and slots," *Proc. of SPIE*, 8704, 870419-1-5, 2013.
 [6] Antoni Rogalski, "Infrared detectors: an overview," *Infrared Physics & Technology*, 43, 187 - 210, 2002.
 [7] J. L. Tissot, "IR detection with uncooled sensors" *Infrared Physics & Technology*, 46, 147-153 2004.
 [8] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*, Wiley, New York, pp. 395-414, 1996.
 [9] S. E. Kucuk, M. Y. Tanrikulu, T. Akin, "A detailed analysis for the absorption coefficient of multilevel uncooled infrared detectors," *Proc. of SPIE*, 8012, 8012R-1, 2011.
 [10] H. Bosman, Y. Y. Lau, and R.M. Gilgenbach,

"Microwave absorption on a thin film," *Appl. Phys. Lett.* 82, 1353 2003.
 [11] L. K. Ang, T. J. T. Kwan, and Y. Y. Lau, "New Scaling of Child-Langmuir Law in the Quantum Regime," *Phys. Rev. Lett.* 91, 208303, 2003.
 [12] A. Valfells1, L. K. Ang1, Y. Y. Lau1 and R. M. Gilgenbach, "Effects of an external magnetic field, and of oblique radio-frequency electric fields on multipactor discharge on a dielectric," *Phys. Plasmas*, 7, 750, 2000.
 [13] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, chapter 3, 1993.
 [14] S. Ramo, J.R. Whinnery, T. Van Duzer, *Field and wave electromagnetics*, John Wiley & Sons, chapter 5, 1994.
 [15] <http://refractiveindex.info/?group=METALS&material=Gold>
 [16] <http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=Si3N4>
 [17] S. Ramo, J.R. Whinnery, T. Van Duzer, *Field and wave electromagnetics*, John Wiley & Sons, chapter 13, 1994.
 [18] S.N. Svitashva, V.N. Kruchinin, "Spectral dependence of the complex refractive index shift across the semiconductor-metal transition in thermally-oxidized vanadium," *Thin solid Films*, 313 - 314, pp. 319 - 322, 1998.
 [19] B. E. Cole, "Microstructure design for high IR sensitivity," US Patent, 5,286,976, 1994.
 [20] R. A. Wood, "Use of Vanadium oxide in microbolometer sensors," US Patent, RE36615, 2000.
 [21] M. Almasri, B. Xu, and J. Castrance, "Amorphous silicon two-color Microbolometer for Uncooled IR detection," *IEEE Sensors Journal*, 6, 2, 2006.
 [22] C. J. E. Zins and B. E. Cole, "Flexible high performance microbolometer detector material fabricated via controlled ion beam sputter deposition process," US Patent, 6,495,070, 2002.
 [23] R.A. Wood, B. E. Cole, R. E. Higashi, and D. W. Younger, "Tunable sensor," US Patent, 7,145,143B2, 2006.

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, 2008.11~현재 호서대학교 국방과학기술학과 부교수. 관심분야: 적외선 검출기 및 적외선 시스템
 Tel : 041-540-9682
 Fax : 041-540-9548
 E-mail : smanpark@hoseo.edu