



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

다층 기판을 적용한 유도-모드 공진 필터의  
향상된 THz 투과율

Improved THz transmittance of guided-mode resonance filter  
using multi-layer substrate

지도 교수 전태인

2019년 8월

한국해양대학교 대학원

전기전자공학과

이 승 보

본 논문을 이승보의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장      장 낙 원      (인)

위 원      전 태 인      (인)

위 원      길 경 석      (인)

2019년 6월 26일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Figures .....	iii
Abstract .....	iv
1. 서 론 .....	1
2. GMR 필터를 측정하기 위한 실험장치 .....	3
3. GMR에 기본적인 Multi-layer를 적용했을 때 결과 .....	6
4. GMR 필터에서 Mono-layer와 Multi-layer의 차이 .....	15
5. GMR 필터에서 타입의 종류와 그에 따른 공진 특성 .....	22
6. 결 론 .....	36
참고 문헌 .....	38

## List of Figures

그림 1 주파수에 따른 전자기파의 스펙트럼 .....	2
그림 2.1 GMR 필터 실험 시스템 .....	3
그림 2.2 (a) 금속판 및 PET grating(입사파와 수직인 방향에서 본 모습)	4
그림 2.2 (b) 금속판 및 PET grating(입사파의 진행 방향에서 본 모습) ..	4
그림 3.1 Multi-layer의 개수 변화에 따른 공진 주파수 이동과 굴절률의 변화 (시뮬레이션) .....	6
그림 3.2 필터의 물질에 의한 입사파의 손실에 따른 공진의 Transmittance (시뮬레이션) .....	7
그림 3.3 PET film의 총 두께(D2)가 225 $\mu\text{m}$ 이고 Multi-layer의 수가 1개, 3개, 9개일 때의 Transmittance(실제 실험) .....	8
그림 3.4 (a) Multi-layer의 수를 5개로 고정하고 grating을 함께 붙여 Multi-layer의 각 층의 두께(D)를 변화시켰을 때의 공진 변화 .....	10
그림 3.4 (b) Multi-layer의 수를 5개로 고정하고 grating이 없이 Multi-layer 의 각 층의 두께(D)를 변화시켰을 때의 공진 변화 .....	10
그림 3.5 (a) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가 25 $\mu\text{m}$ 이고 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance .....	12
그림 3.5 (b) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가 50 $\mu\text{m}$ 이고 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance .....	12
그림 3.5 (c) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가 75 $\mu\text{m}$ 이고 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance .....	13
그림 3.5 (d) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가 100 $\mu\text{m}$ 이고 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance .....	13

그림 4.1 (a) Mono-layer일 때 PET film의 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진의 변화 .....	15
그림 4.1 (b) Multi-layer일 때 PET film의 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진의 변화(Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m) .....	15
그림 4.2 (a) PET film의 전체 두께(D2)가 25 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance(Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m) .....	18
그림 4.2 (b) PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance(Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m) .....	18
그림 4.2 (c) PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance(Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m) .....	19
그림 4.2 (d) PET film의 전체 두께(D2)가 188 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance(Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m) .....	19
그림 5.1 (a) GMR 필터의 3가지 타입 및 각각의 필드 분포 .....	22
그림 5.1 (b) PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m이고 Mono-layer일 때 각각의 타입에 따른 공진의 차이 .....	22
그림 5.2 (a) B-type에서 Mono-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화 .....	25
그림 5.2 (b) B-type에서 Multi-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화 .....	25
그림 5.2 (c) C-type에서 Mono-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화 .....	26
그림 5.2 (d) C-type에서 Multi-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화 .....	26
그림 5.3 (a) A-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	29
그림 5.3 (b) B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	29
그림 5.3 (c) B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	30

그림 5.3 (d) A-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	30
그림 5.3 (e) B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	31
그림 5.3 (f) C-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance .....	31

# Improved THz transmittance of guided-mode resonance filter using multi-layer substrate

Lee, Seung Bo

Department of Electrical and Electronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

This paper focuses on the improvement of the filter performance by applying multi-layer to the conventional GMR(guided-mode resonance) filter. The conventional GMR filter has a disadvantage in that the resonance depth of the transmission wave is reduced due to the loss of the incident wave generated by the filter. In order to overcome these disadvantages, we applied the multi-layer to the conventional GMR filter. Here, the multi-layer means that the PET film, which acts as a waveguide in the GMR filter, is stacked alternately with the air-layer and the thinner PET film. And the total thickness of the conventional PET film and the multi-layered PET film including the air layer is the same.

This multi-layered GMR filter was measured using THz-TDS and compared with the experimental results of the conventional GMR filter.

**KEY WORDS:** Multi-layer 다층 기판; GMR(guided-mode resonance) 유도-모드 공진.

In addition we have experimented and analyzed the GMR filter with multi-layers in three different types. Since each type has different characteristics, it can be applied appropriately according to the situation.

## 제 1 장 서 론

테라헤르츠(THz) 전자기파는 전자기파 스펙트럼에서 주파수가 0.1THz~10THz에 해당하는 전자기파로서 이는 마이크로파와 적외선 사이에 존재한다. THz파는 마이크로 영역이나 광학 영역의 파장을 가지는 전자기파가 투과하지 못하는 물질들을 투과할 수 있다. 또한 THz파는 비파과적인 특성 및 이온화를 시키지 않는 특성을 가지고 있다. 그래서 THz파에 의해서 투과된 물질이 파괴되거나 이온화하지 않는다. 이러한 특성 때문에 THz파를 이용하고 잘 다루기 위해서 다양한 방법을 통한 필터, 렌즈 등 여러 광학 장치들이 개발되었다[1-5].

GMR(guided-mode resonance) 현상은 이전부터 여러 전자기파 영역에서 필터 및 모듈레이터, 센서, 플라리저 등으로 많이 사용되어왔다[6-10]. 하지만 THz 영역에서는 활용되지 않고 있었다. 그러다 최근에 THz 영역에서 동작하는 GMR 현상을 활용한 필터가 개발됐다[11-13]. 개발된 GMR 필터는 slab wave guide(PET) 위에 grating(PET)을 결합한 형태이다.

GMR 필터는 높은 Q-factor를 가진다는 장점이 있다. 하지만 GMR 필터는 필터의 물질에 의한 입사파의 손실이 커지면 투과 스펙트럼에서 유도된 공진의 깊이가 작아지는 단점을 가지고 있다. 즉 GMR 필터의 장점이 사라지게 되는 것이다. 이러한 것을 보상하기 위해서 본 논문에서는 Multi-layer를 적용했다.

Multi-layer는 서로 다른 굴절률 및 특성을 가진 층을 여러 개 겹치는 것 또는 특정한 구조 및 패턴이 있는 같거나 비슷한 층들을 여러 개 겹치는 것을 의미한다[14, 15]. 이렇게 여러 장의 층을 겹치게 해서 각층의 서로 다른 특성이 합쳐져서 나타나는 특성을 가지게 하거나 하나의 층으로만 이루어졌을 때의 특성보다 더 강화되고 향상된 특성을 가지게 한다. Multi-layer의 각 층의 두께 또는 특성을 조정하여서 전반전인 기능을 조절할 수 있다. Multi-layer는 주로 오래전부터 밴드 패스 필터[16-19], 흡수체[20-27], 반사 및 반사 방지 코팅[28-35], 미러[36], 빔 스플리터[37] 등에 적용되어 개발되어왔다. 비교적 최근에

는 메타 물질이 주목받기 시작하면서 메타 물질에도 적용되어서 해당 필터의 공진 및 투과 특성을 향상시키는 목적으로 적용되었다[15, 28]. 이러한 Multi-layer는 어떠한 특정 전자기파 영역에만 국한된 것이 아니라 마이크로 영역, THz 영역 및 광학 영역 전반에 걸쳐서 이용되고 있다.

그래서 최근에 제안된 GMR 필터의 성능을 향상시키기 위해서 본 논문에서는 Multi-layer를 적용시킨 GMR 필터를 개발하였다. 우리가 적용시킨 Multi-layer는 하나의 물질로 균일하게 이루어진 GMR 필터의 slab wave guide를 같은 물질로 이루어진 더 얇은 slab wave guide 여러 개를 공기층과 번갈아 가면서 쌓아 올려서 원래의 slab wave guide의 두께와 같게 한 것을 의미한다. 이렇게 하면 기존의 slab wave guide와 두께는 같지만 평균 굴절률이 떨어지게 된다. 따라서 Multi-layer를 적용시키면 앞에서 언급한 GMR 필터의 단점인 필터 자체에서 발생하는 입사파의 손실이 커지면 필터의 성능이 떨어진다는 것을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 Multi-layer를 적용시킨 GMR 필터에 대한 특성을 연구했다. 그리고 실제 실험결과를 확인하기 위해서 FDFD 시뮬레이션을 시행해서 서로 비교하여 잘 맞는지 확인하였다. 추가적으로 우리는 FDFD 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있는 공진이 가지는 Q-factor의 크기가 실제 실험에서 어떻게 반영되는지에 대한 분석도 수행하였고 Multi-layer의 적용이 가능한 한계에 대해서도 알 수 있었다.

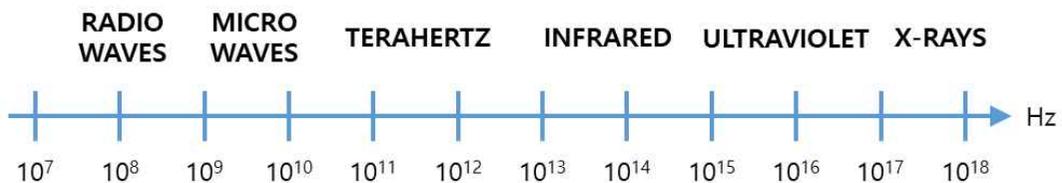


그림 1 주파수에 따른 전자기파의 스펙트럼

## 제 2 장 GMR 필터를 측정하기 위한 실험장치

### 2.1 GMR 필터를 측정하기 위한 TDS 시스템

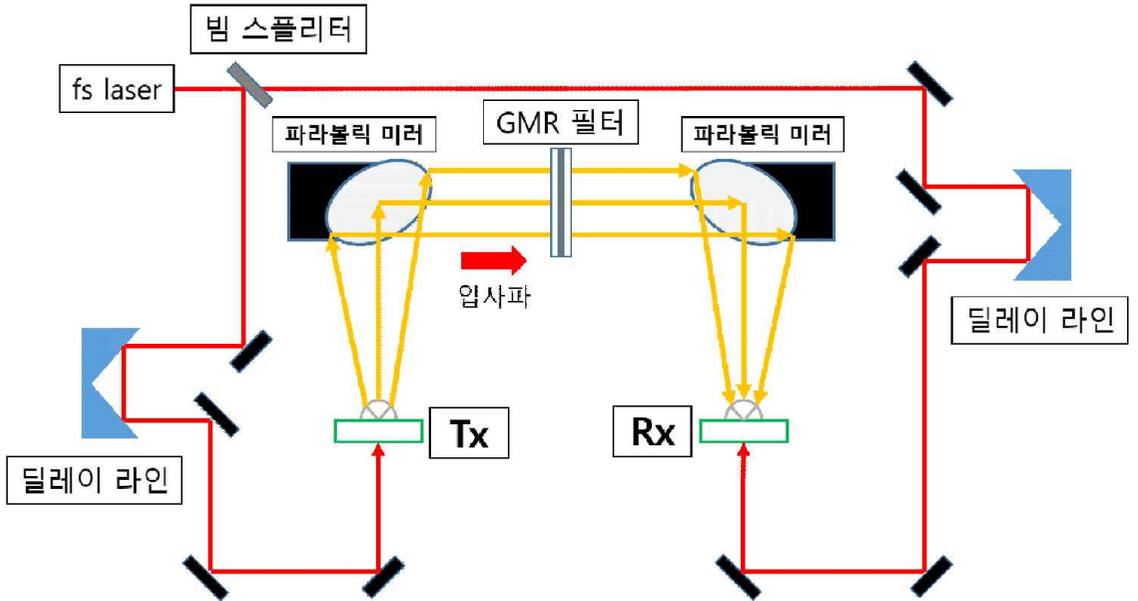


그림 2.1 GMR 필터 실험 시스템

그림 2.1은 GMR 필터를 측정하기 위한 THz TDS 시스템(THz Time domain spectroscopy)을 도식화한 것이다. 그림 2.1에서 fs laser에서 나온 레이저가 빔 스플리터를 거쳐 두 방향으로 양분하면 송신기(Tx)와 수신기(Rx)로 들어간다. 그러면 송신기에서 THz 파가 발생하게 되고 수신기에서는 파라볼릭 미러를 거쳐서 들어오는 THz 파를 받아서 연결된 컴퓨터가 측정하게 된다. 이때 THz 파의 이동 경로상인 파라볼릭 미러 사이에 GMR 필터를 잘 위치시켜서 측정하게 된다. 그림 2.1에서 보이는 GMR 필터를 고정하기 위해서 GMR 필터의 양면에 금속판을 위치시켜서 결합하였다.

## 2.2 GMR 필터의 구체적인 구조

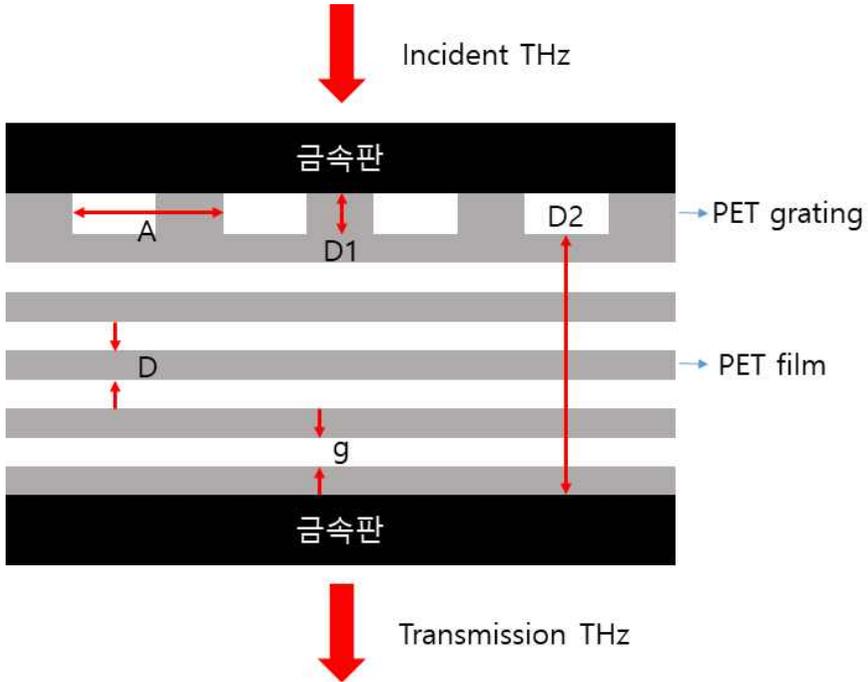


그림 2.2 (a) 금속판 및 PET grating  
(입사파와 수직인 방향에서 본 모습)

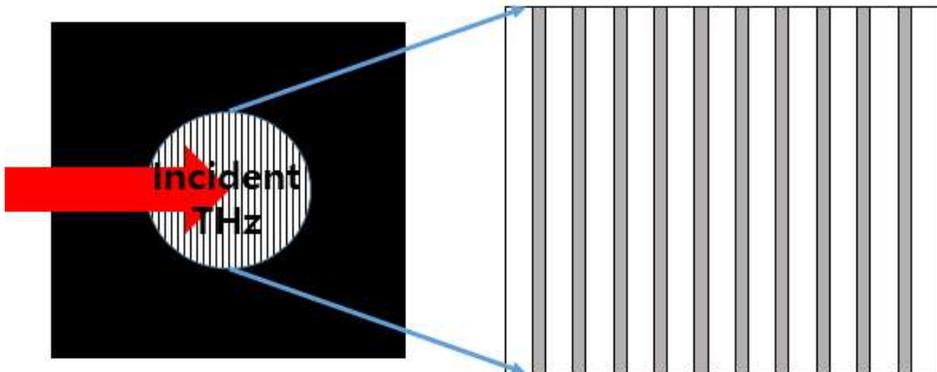


그림 2.2 (b) 금속판 및 PET grating  
(입사파의 진행 방향에서 본 모습)

그림 2.1에서 보이는 GMR 필터를 확대해서 본 것이 그림 2.2(a)와 그림 2.2(b)이다. 그림 2.2(a)는 입사하는 THz파와 수직인 방향에서 본 GMR 필터의 모습이다. 앞서서 언급한 것과 같이 GMR 필터의 양면에 금속판 2개를 각각 붙여서 고정하였다. 그림 2.2(b)는 입사하는 THz파의 진행 방향에서 본 것이다.

본 논문에서 GMR 필터는 PET grating과 PET film이 붙어있는 구조이다. 여기에서 PET film이 앞선 서론에서 언급된 slab wave guide의 역할을 한다. 따라서 PET film이 하나의 물질로 균일하게 이루어진 상태인 Mono-layer에서 전체 두께는 같게 하면서 공기층을 PET film 사이사이에 삽입한 것이 Multi-layer이다. 그래서 Mono-layer와 Multi-layer는 서로 상대되는 구조라고 볼 수 있다.

그림 2.2(a)에서 보면 PET film에 공기층이 삽입되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 2.2(a)는 Multi-layer를 나타낸 것이다. 만약 공기층이 없고 전부 PET film이라면 Mono-layer가 되는 것이다. 그림 2.2(a)에서 A는 PET grating의 주기의 크기, D는 Multi-layer일 때 PET film의 각 층의 두께, D1은 PET grating의 두께, D2는 PET film의 전체 두께, g는 공기층의 두께를 의미한다. 본 논문에서 사용되는 PET grating은 A는  $510\mu\text{m}$ , D1은  $75\mu\text{m}$ , Filling factor(주기 중에서 PET가 차지하는 비율)는 32%로 약  $163.2\mu\text{m}$ 이다.

그림 2.2(b)의 왼쪽은 가운데 지름이 2.64cm인 구멍이 뚫리고 가로와 세로 모두 6.6cm 두께는 0.36cm인 금속판을 나타낸 것이다. 이 구멍을 통해서 THz파가 GMR 필터를 지나가게 된다. 오른쪽은 왼쪽 금속판의 구멍으로 보이는 PET grating을 확대한 것이다.

## 제 3 장 GMR에 Multi-layer를 적용했을 때 결과

### 3.1 layer의 개수에 따른 공진의 주파수 및 굴절률 변화(시뮬레이션)

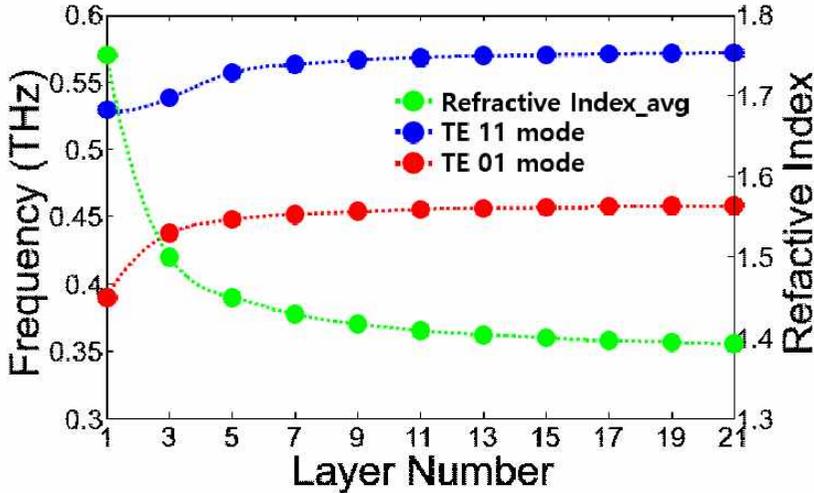


그림 3.1 Multi-layer의 개수 변화에 따른 공진의 주파수 이동과 굴절률의 변화(시뮬레이션)

그림 3.1은 FDFD 시뮬레이션을 통해서 PET film의 총 두께(D2)를 225 $\mu$ m로 고정하고 Multi-layer의 수를 점점 많아졌을 때의 공진 주파수의 이동과 굴절률의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. D2를 고정한 상태에서 layer의 개수가 늘어나므로 각 layer의 두께는 점점 줄어든다. 시뮬레이션 결과 첫 번째로 GMR 필터의 평균 굴절률이 film의 수가 많아질수록 작아지다가 포화상태가 되는 것을 알 수 있다. 이는 총 두께가 고정된 상태에서 Multi-layer의 수가 계속 많아지면 GMR 필터에서 공기가 차지하는 비율이 최대 약 50%까지 높아지므로 평균 굴절률이 감소하다가 포화상태에 이르는 것은 자명한 사실이다. 두 번째로 TE<sub>0,1</sub>과 TE<sub>1,1</sub>으로 나타낸 두 가지의 공진은 Multi-layer의 수가 많아질수록 조금씩 더 높은 주파수 방향으로 이동하다가 평균 굴절률과 마찬가지로 포화상태에 이르는 것을 알 수 있다.

### 3.2 입사파의 손실에 따른 Transmittance의 변화(시뮬레이션)

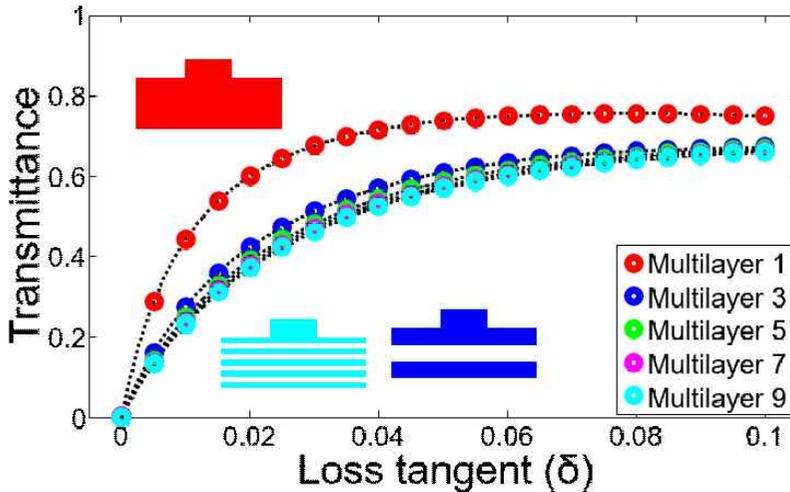


그림 3.2 필터의 물질에 의한 입사파의 손실에 따른 공진의 Transmittance(시뮬레이션)

그림 3.2는 PET film의 총 두께(D2)가 175 $\mu\text{m}$ 인 GMR 필터에 의한 입사파의 손실에 따라서 주파수 영역에서의 공진 크기의 변화를 FDFD 시뮬레이션으로 나타낸 것이다. 여기에서 Transmittance가 1일 경우는 공진이 전혀 없는 것이고 0일 경우는 공진이 이상적으로 완벽하게 일어난 것을 의미한다. 그림 3.2의 내부에 삽입된 그림은 각각의 색깔이 같은 Multi-layer의 측면도를 나타내 것이다. 그림 3.2의 그래프를 보면 물질에서 일어나는 THz의 손실(loss tangent)이 커질수록 Transmittance가 점점 커져서 공진이 점점 없어지는 볼 수 있다. 이를 보상하기 위해서 Multi-layer를 적용시키면 같은 손실(loss tangent)일 때 Multi-layer의 숫자가 커질수록 Transmittance가 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉 공진의 크기가 점점 커진다. 결과적으로 시뮬레이션을 통해서 Multi-layer를 적용시켰을 때 공진의 깊이를 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 Multi-layer를 적용시킨 측정결과(실제 실험)

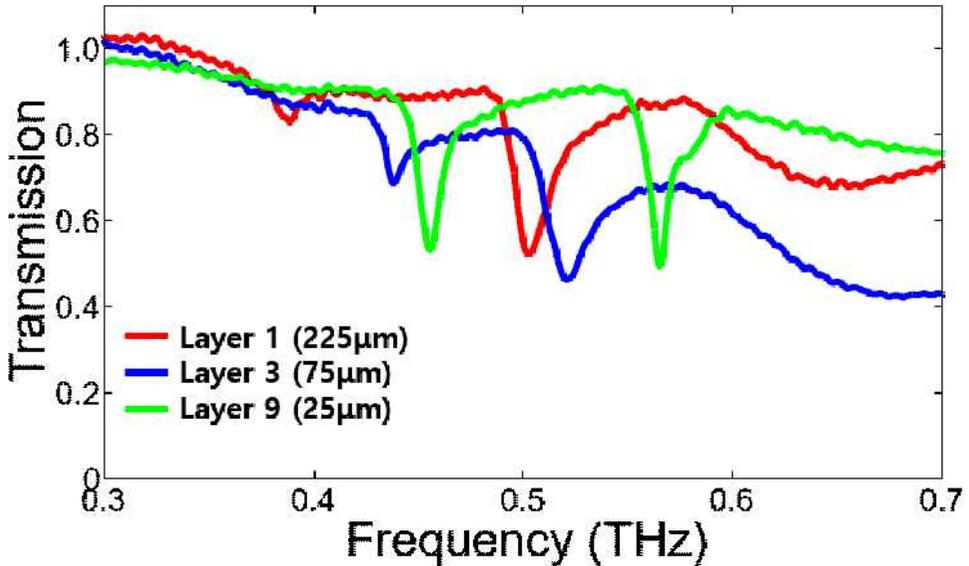


그림 3.3 PET film의 총 두께(D2)가 225 $\mu$ m이고 Multi-layer의 수가 1개, 3개, 9개일 때의 Transmittance(실제 실험)

그림 3.3은 PET film의 총 두께(D2)를 225 $\mu$ m로 고정시키고 Multi-layer의 숫자를 1, 3, 9로 변경하면서 측정한 결과이다. Multi-layer의 숫자가 1일 때는 두께가 225 $\mu$ m인 하나의 PET film으로 slab wave guide를 구성한 것이다. 즉 이것은 Mono-layer인 상태를 의미한다. Multi-layer의 숫자가 3일 때는 75 $\mu$ m인 PET film 2개와 공기층 1개가 서로 번갈아 가면서 구성된 것이다. Multi-layer의 숫자가 9일 때도 같은 패턴으로 25 $\mu$ m인 PET film 5개와 공기층 4개가 서로 번갈아 가면서 구성된 것이다. 그리고 각각의 그래프에서 상대적으로 저주파수 쪽에서 나오는 공진은  $TE_{0,1}$ 이고 상대적으로 고주파수 쪽에서 나오는 공진이  $TE_{1,1}$ 이다.

slab wave guide의 역할을 하는 PET film의 Multi-layer의 숫자가 1일 때, 즉 Mono-layer일 때는 공진( $TE_{0,1}$ )의 크기가 매우 작은 것을 알 수 있다. 하지만 Multi-layer의 숫자가 3으로 늘어나면 공진( $TE_{0,1}$ )의 크기가 약간 향상되었고 공

진의 위치가 고주파수 방향을 위치가 이동한 것을 볼 수 있다. Multi-layer의 숫자가 9로 늘어났을 때도 마찬가지로 공진( $TE_{0,1}$ )의 크기가 향상되고 공진의 위치가 고주파수 방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 이것은 앞선 시뮬레이션 결과인 그림 3.1과 그림 3.2의 결과와 잘 맞는다.

### 3.4 각 층의 두께(D)와 grating에 따른 공진 변화(시뮬레이션)

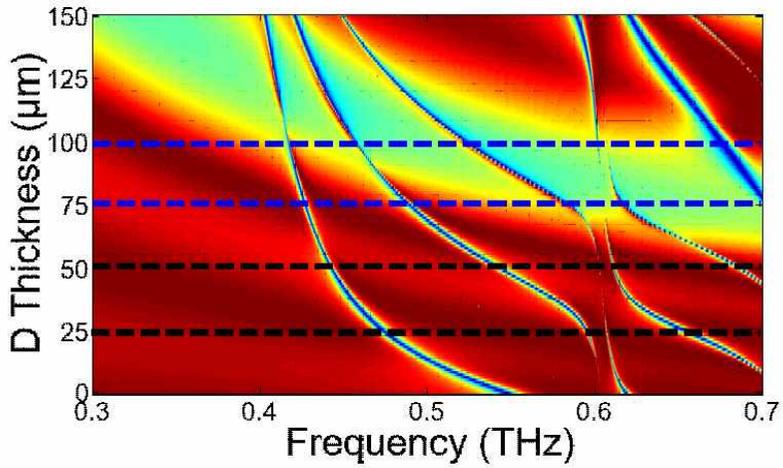


그림 3.4 (a) Multi-layer의 수를 5개로 고정하고 grating을 함께 붙여 각 층의 두께(D)를 변화시켰을 때의 공진 변화

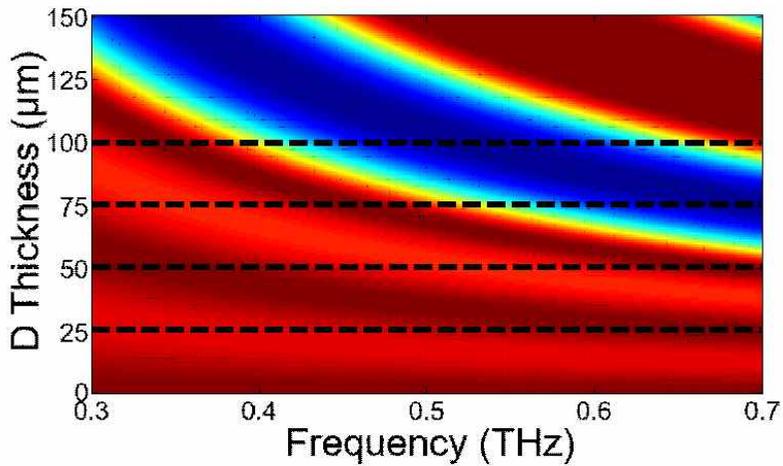


그림 3.4 (b) Multi-layer의 수를 5개로 고정하고 grating이 없이 각 층의 두께(D)를 변화시켰을 때의 공진 변화

그림 3.4(a)는 Multi-layer의 개수를 5개로 고정하고 grating을 함께 붙여 각 층의 두께(D)를 변화시켰을 때의 공진을 시뮬레이션 한 결과이고 그림 3.4(b)는 그림 3.4(a)와는 다르게 grating을 붙이지 않고 Multi-layer만 있는 상태를 시뮬레이션 한 것이다. 즉 그림 3.4(a)는 일반적인 GMR 필터의 결과이고 그림 3.4(b)는 GMR 필터에서 grating이 없는 상태의 결과이다. 그림 3.4(a)는 grating이 붙어있음으로 인해 입사되는 THz 파가 회절을 하게 된다. 주파수에 따라서 grating을 통과할 때 회절을 하는 정도가 다르다. 이때 임계각을 넘어서는 모드의 주파수 성분은 PET film(Multi-layer)을 통과하지 못하고 내부전반사가 되어 좌우로 빠져나가 버린다. 그래서 그림 3.4(a)의 시뮬레이션 결과에서 보면 두께에 따라서 여러 가지 공진이 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞서서 언급했듯이 저주파수 쪽에 보이는 공진이  $TE_{0,1}$ 이고 고주파수 쪽에서 보이는 공진이  $TE_{1,1}$ 이다.

그와는 다르게 그림 3.4(b)는 grating이 없이 PET film(Multi-layer)을 바로 THz 파가 통과해서 Multi-layer가 마치 1D photonic crystal[38]과 같이 행동하여 특정한 조건을 만족하는 THz파의 일부분에서 투과가 일어나지 않는 부분을 볼 수 있다.

위의 그림 3.4(a)를 보면 각 층의 두께(D)가 두꺼워질수록 높은 차수의 공진을 함께 볼 수 있고 얇아질수록 더 적은 수의 낮은 차수의 공진만을 볼 수 있다. 그리고  $TE_{0,1}$ 를 기준으로 각 층의 두께(D)가  $100\mu\text{m}$ 를 넘어가기 시작하면 점점 공진의 깊이가 적어지는 밴드에 도달하게 되는데 이는 Multi-layer의 각 층의 두께(D)에 한계가 있음을 의미한다. 이러한 이유가 아니어도 시뮬레이션 상에서는 고려되지 않은 물질의 손실 때문에 두께(D)에는 한계가 있을 수밖에 없다. 그래서 최대한 물질에 의한 손실의 영향을 줄이고 고차 모드를 피하려면 실제 실험에서는 가능한 얇은 두께(D)를 선택하면 좋다.

### 3.5 각 층의 두께(D)와 grating에 따른 공진 변화(실제 실험)

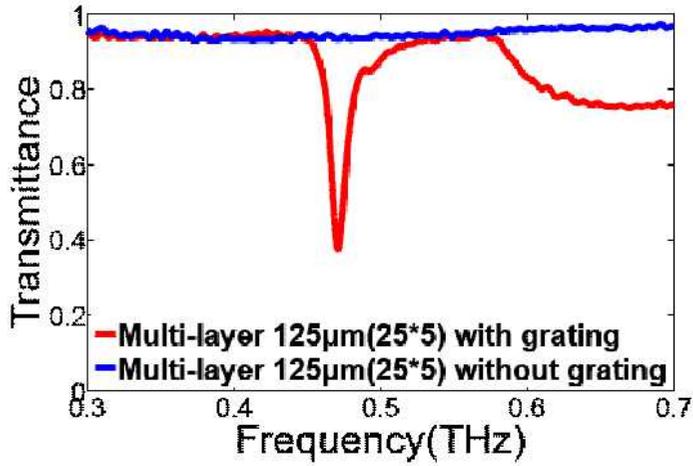


그림 3.5 (a) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가  $25\mu\text{m}$ 일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance

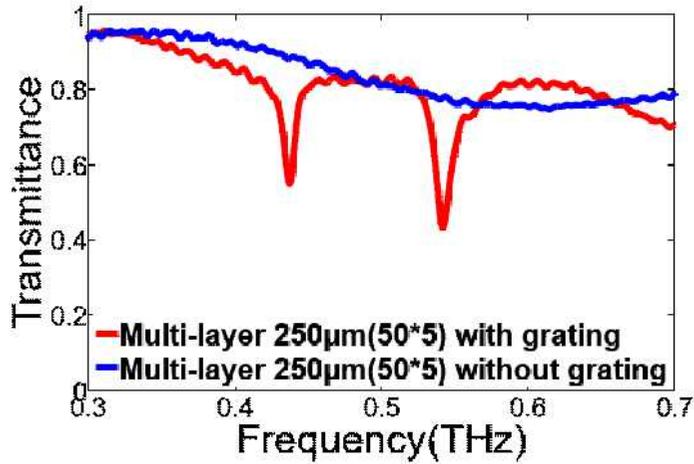


그림 3.5 (b) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가  $50\mu\text{m}$ 일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance

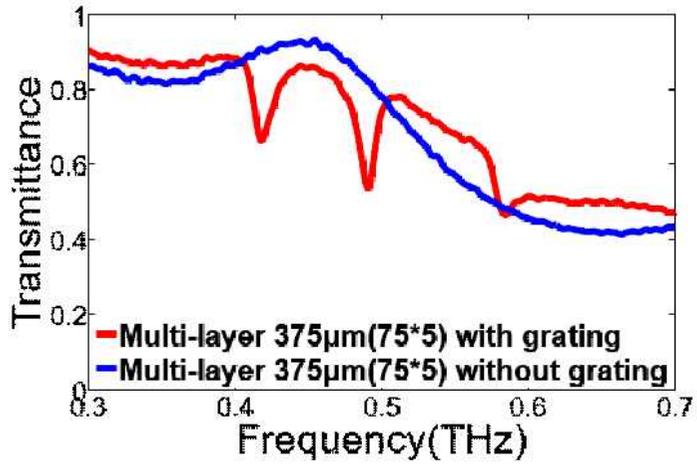


그림 3.5 (c) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가  $75\mu\text{m}$ 일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance

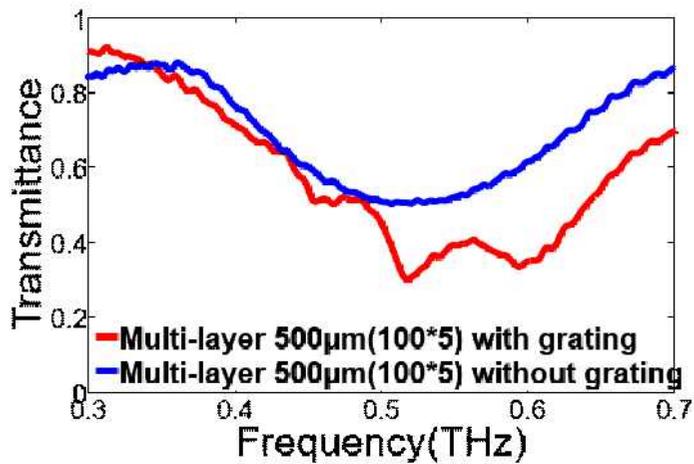


그림 3.5 (d) Multi-layer의 각 층의 두께(D)가  $100\mu\text{m}$ 일 때 grating의 유무에 따른 Transmittance

그림 3.5(a), (b), (c), (d)는 그림 3.4(a), (b)의 시뮬레이션 결과에 대한 실제 실험 결과이다. 그림 3.5(a)는 각각의 층 두께가  $25\mu\text{m}$ 이면서 5개로 이루어진 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따라 측정된 것이었다. grating이 없을 때는 공진이 보이지 않고 grating이 있을 때는  $TE_{0,1}$ 만 보인다. 그림 3.5(a)의 시뮬레이션에 해당하는 그림 3.4(a)의 세로축  $25\mu\text{m}$ 를 기준으로 가로로 그어진 선을 보면  $TE_{0,1}$ 뿐만 아니라  $TE_{1,1}$ 도 보이는 것을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션에서  $TE_{1,1}$ 이 거의 보이지 않는 지점에 존재하기 때문에 실제 실험에서는 나타나지 않는 것으로 볼 수 있다.

그림 3.5(b)는 각각의 층 두께가  $50\mu\text{m}$ 이면서 5개로 이루어진 Multi-layer일 때 grating의 유무에 따라 측정된 것이다. 각각의 층이  $25\mu\text{m}$ 였던 그림 3.5(a)와는 다르게 grating이 있을 때  $TE_{0,1}$ 과  $TE_{1,1}$ 이 모두 보인다. 그림 3.4(a)의 세로축  $50\mu\text{m}$ 를 기준으로 가로로 그어진 선을 보면  $TE_{0,1}$ 과  $TE_{1,1}$ 이 모두 보여서 실험과 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그림 3.5(c)와 그림 3.5(d)도 각각에 해당하는 두께를 그림 3.4(a) 시뮬레이션에서 보면 실험결과와 시뮬레이션이 서로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

위의 그림 3.5(a), (b), (c), (d)를 종합적으로 분석해보면 시뮬레이션과 서로 잘 일치한다는 것을 알 수 있고 시뮬레이션과 마찬가지로 각각의 층의 두께가 두꺼워 질수록 Multi-layer가 1D photonic crystal과 같은 역할을 하여서 특정한 조건을 만족하는 THz 파의 일부분에서 투과가 일어나지 않는 부분이 있는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

## 제 4 장 전체 두께(D2)에 따른 Mono-layer와 Multi-layer

### 4.1 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진 변화(시뮬레이션)

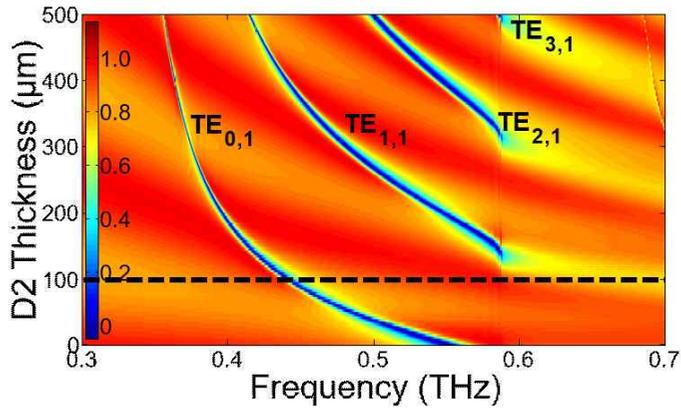


그림 4.1 (a) Mono-layer일 때 PET film의 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진의 변화

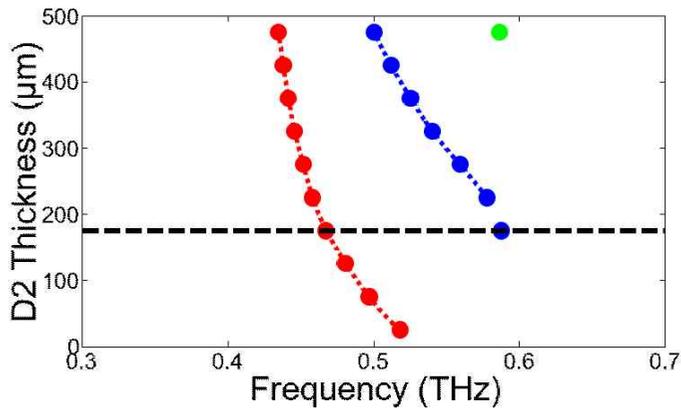


그림 4.1 (b) Multi-layer일 때 PET film의 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진의 변화 (Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu\text{m}$ )

그림 3.5(a), (b), (c), (d)는 실제 실험에서 grating이 없어서 GMR 구조가 아닐 때와 grating이 있어서 GMR 구조일 때의 차이점을 보여준 것이고 그림 4.1(a), (b)는 GMR 구조에서 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 Mono-layer인 경우와 multi-layer인 경우의 특징 및 차이를 보여주는 시뮬레이션이다.

그림 4.1(a)는 Mono-layer인 GMR 구조에서 PET film의 전체 두께(D2)가  $0\mu\text{m}$ 에서부터  $500\mu\text{m}$ 까지 변화할 때의 공진이 어떻게 변화하는지를 FDFD 시뮬레이션으로 연속적으로 나타낸 그래프이다. 그림 4.1(a)에서 세로축(D2)에서  $100\mu\text{m}$ 에서 가로로 그어진 검은 점선보다 아래쪽 두께(D2)는 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만 보이고 그보다 위쪽인 약  $100\mu\text{m}$ 에서 약  $300\mu\text{m}$  두 개의 공진( $TE_{0,1}, TE_{1,1}$ )이 보인다. 그보다 더 위쪽인  $300\mu\text{m}$ 에서는 앞선 두 개의 공진에 더해 3번째 공진( $TE_{2,1}$ )이 보이고 거의  $500\mu\text{m}$ 에 다다르면 4번째 공진( $TE_{3,1}$ )도 보인다. 결과적으로 이것은 PET film의 전체 두께(D2)가 두꺼워지면 두꺼워 질수록 더 많은 공진이 나타난다는 것을 알 수 있다. 물론 이것은 시뮬레이션 상에서 손실이나 다중 반사가 없는 이상적이 상태이기 때문에 이렇게 나온 것이다. 실제 실험에서는  $400\mu\text{m}$  또는  $500\mu\text{m}$ 라는 두께는 너무 두꺼워서 손실이 매우 크기 때문에 선택하지 않고  $225\mu\text{m}$  이하의 두께를 선택하는 것이 적합하다.

그림 4.1(b)는 각 층의 두께(D)가  $25\mu\text{m}$ 로 설정된 Multi-layer인 GMR 구조에서  $0\mu\text{m}$ 에서부터  $500\mu\text{m}$ 까지 변화할 때의 공진이 어떻게 변화하는지를 FDFD 시뮬레이션으로 나타낸 불연속적인 그래프이다. Multi-layer는 각 층의 두께가 일정하게 정해져 있어서 Mono-layer처럼 연속적인 두께로는 FDFD 시뮬레이션을 실행할 수 없다. 그래서 한 번에 공기층과 PET film층이 함께 늘어나서  $50\mu\text{m}$ 씩 차이가 나는 불연속적인 그래프가 나타나게 되었다. 그림 4.1(b)에서 세로축(D2)가  $175\mu\text{m}$ (검은 점선) 이하에서는 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만 보이고  $225\mu\text{m}$ 부터  $357\mu\text{m}$ 까지는 두 개의 공진( $TE_{0,1}, TE_{1,1}$ )이 보이고 그 위로는 두 개의 공진을 포함한 3번째 공진( $TE_{2,1}$ )이 보인다. 그리고 Mono-layer에서 보였던 4번째 공진은 보이지 않는다.

위의 두 가지 그래프 그림 4.1(a), (b)를 비교해보면 Mono-layer는 PET film의 전체 두께(D2)가 약  $100\mu\text{m}$  이상부터는 2번째 공진( $\text{TE}_{1,1}$ )이 보이지만 Multi-layer는  $225\mu\text{m}$ 부터 2번째 공진( $\text{TE}_{1,1}$ )이 나타나는 것을 알 수 있다. 결과적으로 Mono-layer일 때보다 Multi-layer일 때 PET film의 전체 두께(D2)가 좀 더 두껍더라도 두 번째 공진( $\text{TE}_{1,1}$ )을 제거할 수 있다는 장점이 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Multi-layer일 때 공진의 위치가 고주파수 방향으로 이동하는 것을 알 수 있는데 이것으로 보아서 Multi-layer로 공진의 위치를 조정하는 것이 가능한 것을 알 수 있다.

#### 4.2 전체 두께(D2)의 변화에 따른 공진 변화(실제 실험)

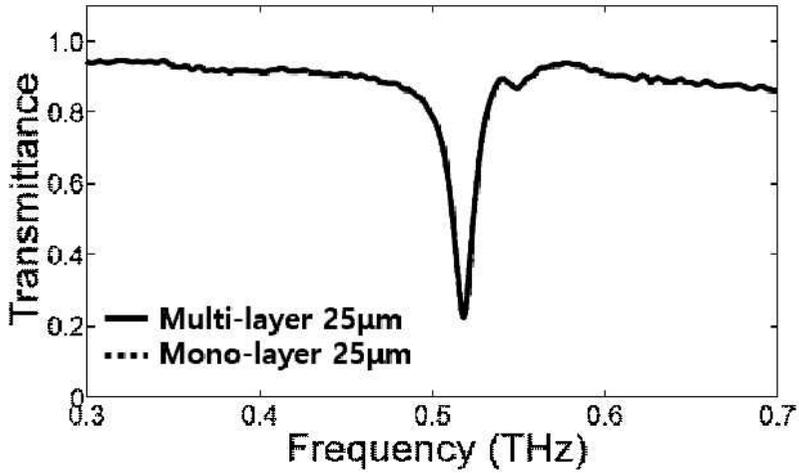


그림 4.2 (a) PET film의 전체 두께(D2)가 25 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance (Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m)

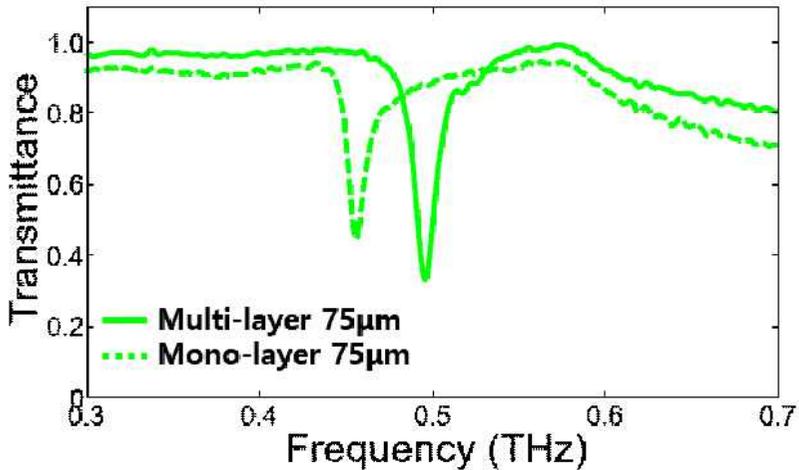


그림 4.2 (b) PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance (Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m)

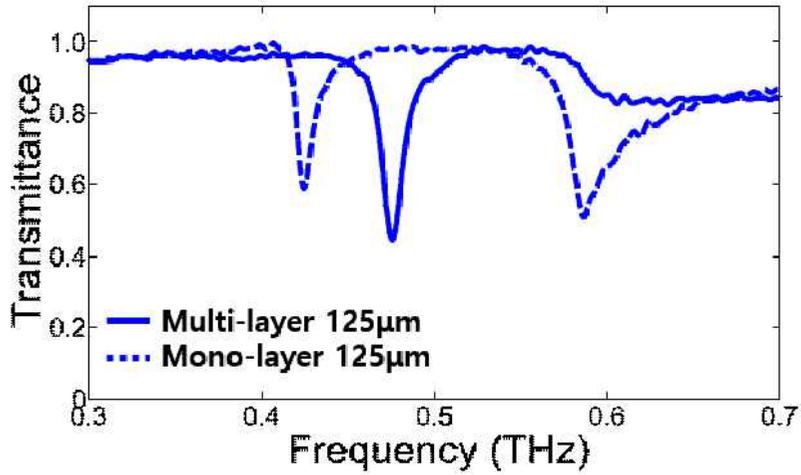


그림 4.2 (c) PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance (Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m)

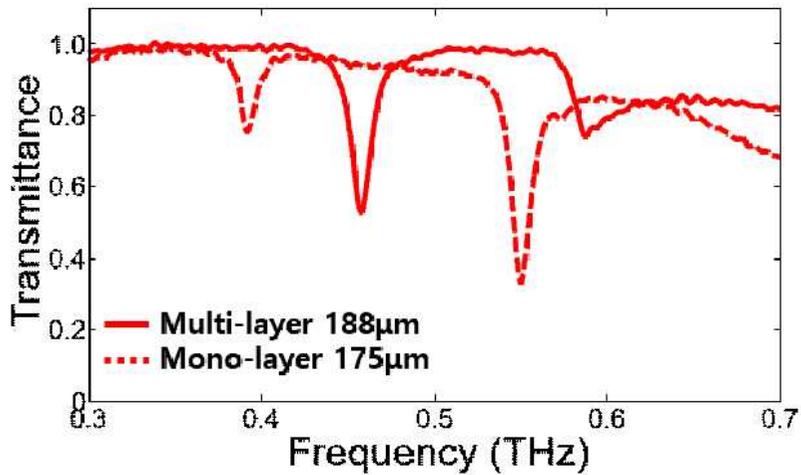


그림 4.2 (d) PET film의 전체 두께(D2)가 188 $\mu$ m일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance (Multi-layer의 각 층의 두께(D): 25 $\mu$ m)

그림 4.2(a), (b), (c), (d)는 앞선 그림 4.1(a), (b)의 시뮬레이션 결과가 현실과 잘 맞는지 알아보기 위한 실제 실험이다. 그래서 그림 4.2(a), (b), (c), (d)는 GMR 구조에서 PET film의 총 두께(D2)가 변하는 조건에서 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때 각각 Transmittance가 어떻게 나오는지에 그래프로 나타낸 것이다. Multi-layer일 때 각 층의 두께(D)는 25 $\mu$ m이다.

먼저 그림 4.2(a)는 PET film의 전체 두께(D2)가 25 $\mu$ m인 조건에서 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때의 Transmittance를 나타낸 것이다. 이때는 Multi-layer에서 각 층의 두께(D)가 최저 25 $\mu$ m이기 때문에 실제로 Multi-layer를 적용하지 못했다. 따라서 Mono-layer일 때의 Transmittance만이 그래프에 나타나 있고 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만 보인다. 이것은 얇은 두께일 때 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만을 보이는 그림 4.1(a)의 시뮬레이션 결과와 서로 잘 맞는다.

그림 4.2(b)는 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu$ m인 조건에서 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때의 Transmittance를 나타낸 것이다. 이때 Multi-layer는 3층으로 이루어져 있다. 그래프에서 Mono-layer를 나타내는 녹색 점선과 Multi-layer를 나타내는 녹색 실선이 모두 똑같이 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만을 보인다. 하지만 그 공진의 깊이는 녹색 실선이 더 깊게 향상되었고 위치 또한 고주파수 방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 이것은 앞선 그림 4.1(a), (b)의 FDFD 시뮬레이션 결과와 잘 맞는다는 것을 알 수 있다.

그림 4.2(c)는 PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m인 조건에서 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때의 Transmittance를 나타낸 것이다. 이때 Multi-layer는 그림 4.2(b)가 3층인 것에서 2층 증가하여 총 5층인 상태이다. 그래프에서 Mono-layer를 나타내는 파란 점선은 두 개의 공진( $TE_{0,1}$ ,  $TE_{1,1}$ )이 나타나고 있다. 반면에 Multi-layer를 나타내는 파란 실선은 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )은 사지라고 Mono-layer일 때보다 공진 깊이가 향상된 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )만이 보이고 있다. 이것 또한 앞선 그림 4.1(a), (b)의 FDFD 시뮬레이션 결과와 잘 맞는다는 보여 주는 것이다.

그림 4.2(d)는 PET film의 전체 두께(D2)가 188 $\mu$ m인 Mono-layer일 때와 PET film의 총 두께(D2)가 175 $\mu$ m인 Multi-layer일 때의 Transmittance를 나타낸 것이다. 원래는 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때의 PET film의 전체 두께(D2)가 같은 조건에서 실험을 진행해야 한다. 하지만 적절한 두께의 PET film이 없어서 최대한 두께의 차이를 적게 해서 실험하게 되었다. 그림 4.2(d)에서 Mono-layer를 나타내는 빨간 점선은 그림 4.2(c)의 Mono-layer와 마찬가지로 두 개의 공진( $TE_{0,1}$ ,  $TE_{1,1}$ )이 나타나고 있다. Multi-layer를 나타내는 빨간 실선은 그림 4.2(c)에서 Multi-layer를 나타내는 파란 실선과 비슷하게 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )이 매우 작아졌다. 그리고 마찬가지로 Multi-layer일 때 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )의 크기가 Mono-layer일 때보다 향상된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 그림 4.2(d)도 앞선 그림 4.2(a), (b), (c)와 마찬가지로 그림 4.1(a), (b) FDFD 시뮬레이션 결과와 서로 잘 맞는다는 것을 알 수 있다.

## 제 5 장 GMR 필터에서 타입의 종류와 공진 특성

### 5.1 GMR 필터의 3가지 타입과 그 특징(시뮬레이션)

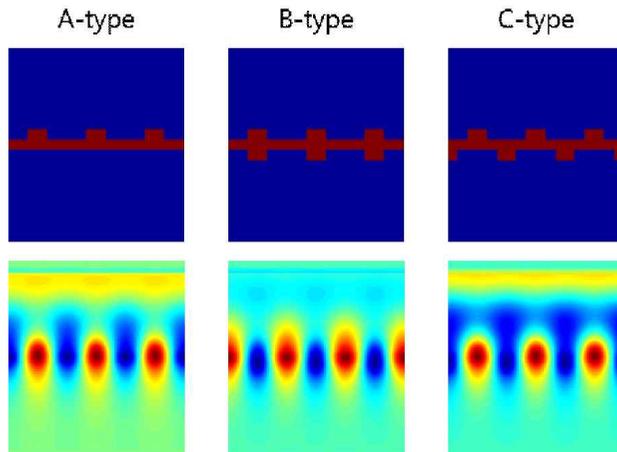


그림 5.1 (a) GMR 필터의 3가지 타입 및 각각의 필드 분포

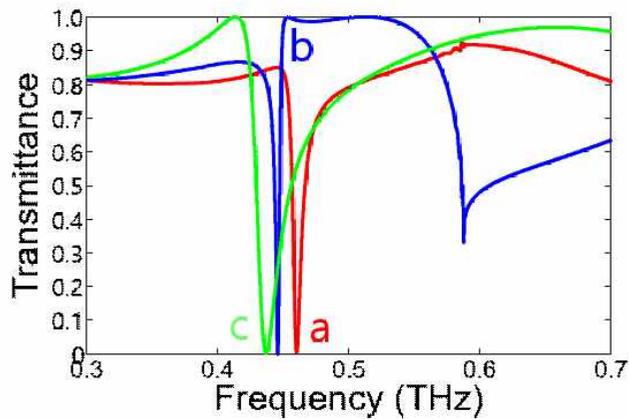


그림 5.1 (b) PET film의 전체 두께(D2)가  $75\mu\text{m}$ 이고 Mono-layer일 때 각각의 타입에 따른 공진의 차이

그림 5.1(a) 이 논문에서 활용되는 GMR 구조의 종류와 그것에 따른 필드 분포를 시뮬레이션을 통해서 나타낸 것이다. 이 논문에서는 A, B, C 3가지 타입의 GMR 구조를 구성해서 사용하였다.

A-type은 일반적으로 알려진 GMR 구조와 같다. 즉 본 논문의 그림 2와 3에서 설명했던 것과 같은 구조이다. 간단하게 설명하면 PET film 위에 PET grating을 붙여서 PET grating 방향으로 들어오는 전자기파는 회절하게 된다. 그 후 PET film으로 들어선 회절 된 전자기파 중에서 임계각을 넘어서는 주파수를 가진 전자기파는 PET film에서 내부전반사를 한다. 결과적으로 그 주파수가  $R_x$ 가 있는 방향으로 나오지 못하고 공진이 일어나는 주파수가 되는 것이다. 이는 그림 5.1(a)의 A-type에 해당한다.

B-type은 A-type의 PET film에서 PET grating이 없는 방향에도 PET grating을 붙인 형태이다. 이때 B-type을 위에서 보았을 때 양방향의 PET grating이 완전히 포개어져서 반대 방향의 PET grating은 완전히 보이지 않게 된다. 이것은 5.1(a)의 B-type에 해당한다. 마지막으로 C-type은 B-type이 PET grating이 완전히 포개어지는 것과는 반대로 엇갈리게 겹쳐져서 위에서 보았을 때 각각의 슬릿의 간격이 같아 보이게 된다. 이것은 그림 5.1(a)의 C-type에 해당한다.

이처럼 3가지의 타입으로 GMR 구조를 나누어서 FDFD 시뮬레이션을 한 결과의 Transmittance가 그림 5.1(b)이다. 그림 5.1(b) PET film의 총 두께(D2)가  $75\mu\text{m}$ 이고 Mono-layer일 때 각각의 타입에 따른 Transmittance를 나타낸 것이다. 그 결과 두께가  $75\mu\text{m}$ 로 작기 때문에 하나의 공진( $TE_{0,1}$ )만이 나타나는 것을 알 수 있고 주파수의 위치가 약간씩 다른 것을 알 수 있다. 그리고 각각의 타입별로 공진( $TE_{0,1}$ )의 Q-factor가 다른 것을 알 수 있다. 상대적으로 봤을 때 가장 높은 Q-factor를 가진 것이 A-type이고 그다음이 B-type 마지막으로 가장 작은 것이 C-type이다.

Q-factor가 서로 다른 것은 실제 실험에서 서로 다른 공진의 깊이가 나온다는 것을 의미한다. 그 이유는 Q-factor가 높으면 높을수록 물질에 의한 전자기

과 손실에 많은 영향을 받기 때문이다. 그래서 실제로 실험을 해보면 그림 5.1(b)에서 보이는 모든 타입의 공진이 Transmittance가 0이 되는 것과는 다르게 공진의 깊이가 물질에 의한 전자기파 손실 때문에 더 작아진다. 그래서 Multi-layer를 적용시켜서 물질에 의한 전자기파 손실을 줄여주면 공진의 깊이가 향상될 것을 예상할 수 있다.

5.2 전체 두께(D2)의 변화와 타입에 따른 공진 변화(시뮬레이션)

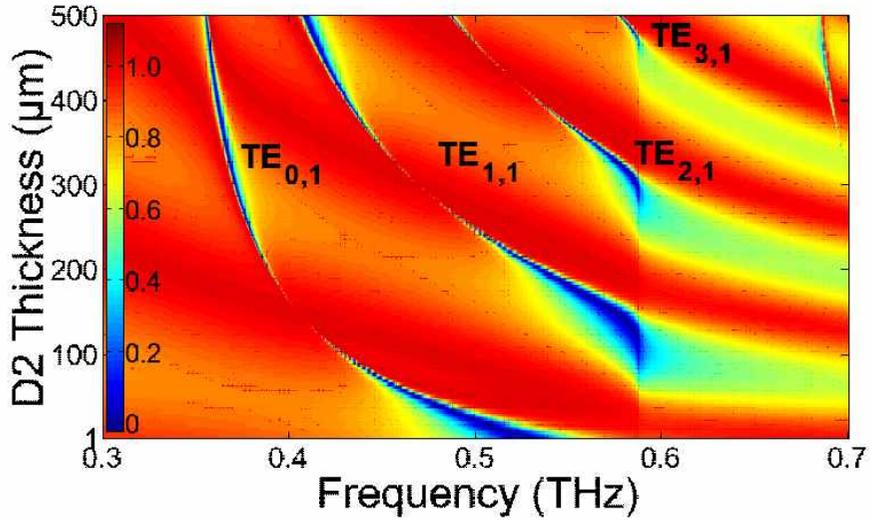


그림 5.2 (a) B-type에서 Mono-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화

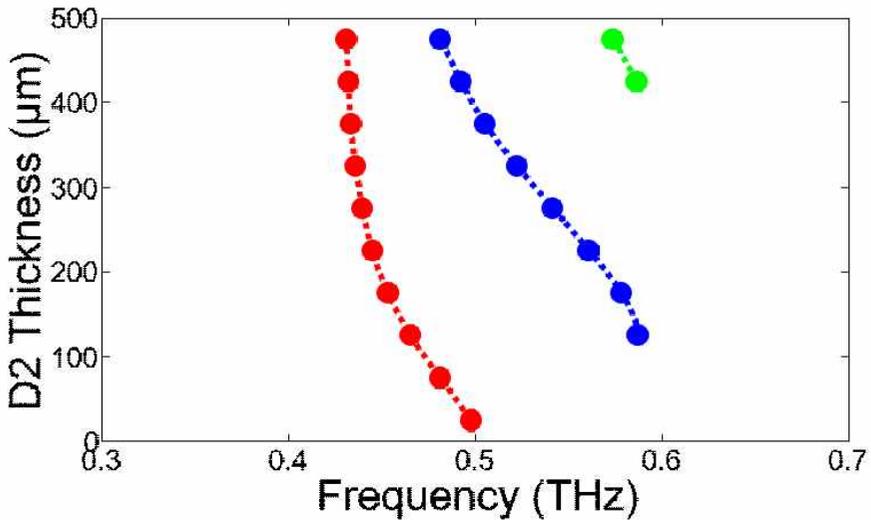


그림 5.2 (b) B-type에서 Multi-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화

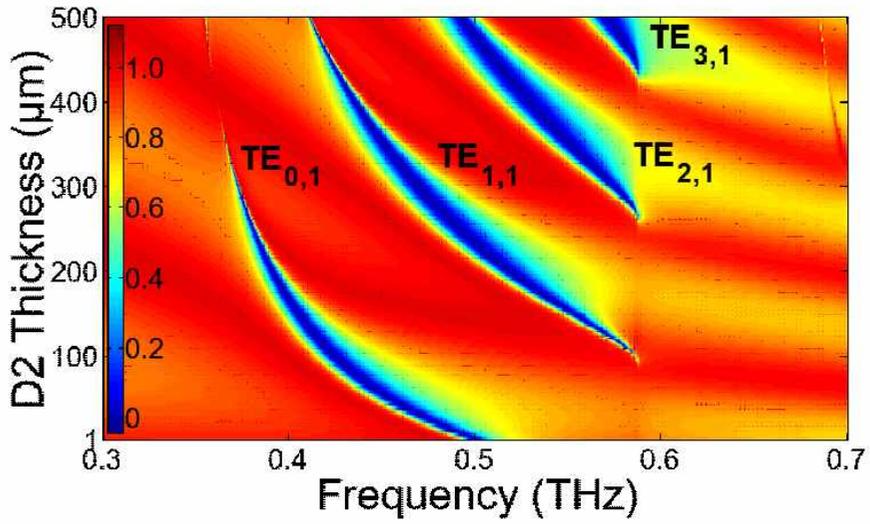


그림 5.2 (c) C-type에서 Mono-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화

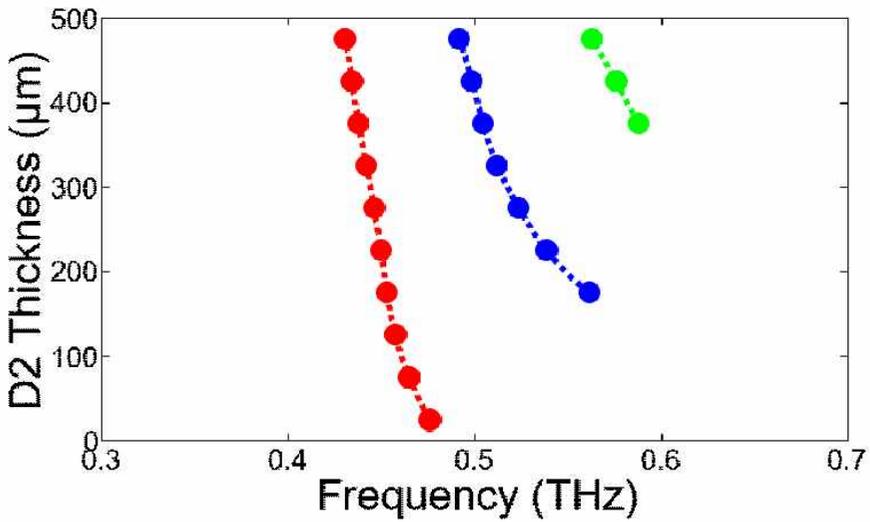


그림 5.2 (d) B-type에서 Multi-layer이고 PET film의 전체 두께(D2)가 변화할 때 공진의 변화

그림 5.2(a), (b)는 B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 변화하고 Mono-layer일 때 공진의 변화와 Multi-layer일 때 공진의 변화를 FDFD 시뮬레이션으로 나타낸 그래프이다. 그림 5.2(c), (d)는 각각 그림 5.2(a), (b)와 같지만 B-type이 아닌 C-type이 적용된 것이다. A-type을 적용시킨 그래프는 그림 4.1(a), (b)와 같으므로 함께 비교해서 볼 수 있다.

그림 5.1 (b)에서는 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu\text{m}$ 일 때 타입에 따라서 공진의 Q-factor가 서로 다른 것을 확인할 수 있었다. 그림 4.1(a), (b)와 그림 5.2(a), (b), (c), (d)는 그림 5.1(b)의 두께조건을 더 확장해서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu\text{m}$ 일 때뿐만 아니라 0~500 $\mu\text{m}$ 까지 변화했을 때 Mono-layer인 경우와 Multi-layer인 경우의 공진 변화를 나타낸다.

그림 4.1(a)와 그림 5.2(a), (c)는 각각 Mono-layer일 때의 A-type, B-type, C-type을 나타내므로 서로를 비교해보면 공진의 Q-factor에 확연한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 그림 5.1(b)에서 확인한 것처럼 B-type, A-type, C-type 순서로 Q-factor가 높다. B-type인 그림 5.2(a)의 경우에는 PET film의 총 두께(D2)가 실제로 실험할 수 있는 구간인 75~225 $\mu\text{m}$ 에서 Q-factor가 매우 높은 것을 알 수 있다. Q-factor가 너무 높아서 공진이 거의 사라져 보이는 구간도 존재한다. 그와는 반대로 C-type에 해당하는 그림 5.2(c)는 마찬가지로 실제 실험 구간인 75~225 $\mu\text{m}$ 에서 Q-factor가 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이때 A-type인 그림 4.1(a)의 Q-factor는 같은 구간에서 B-type과 C-type의 사이에 있다. 이것을 통해서 실제 실험 구간인 75~225 $\mu\text{m}$ 에서 B-type, A-type, C-type 순서로 Q-factor가 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 4.1(b)와 그림 5.2(b), (d)는 각각 Multi-layer일 때의 A-type, B-type, C-type을 나타낸다. 그림 4.1(a)와 4.1(b)를 서로 비교했을 때 Mono-layer인 그림 4.1(a)보다 Multi-layer인 그림 4.1(b)일 때가 PET film의 총 두께(D2)가 상대적으로 더 두꺼운 지점까지 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )이 나타나지 않는다는 것은 이미 앞서서 언급된 내용이다. 이와 마찬가지로 그림 5.2(a), (b)를 서로 비교하고

그림 5.2(c), (d)를 서로 비교하면 4.1(a)와 4.1(b)를 서로 비교한 것과 같은 패턴의 결과가 나온다. 즉 그림 5.2(a)보다 그림 5.2(b)가 또 그림 5.2(c)보다 그림 5.2(d)가 PET film의 총 두께(D2)가 상대적으로 더 두꺼운 곳까지 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )이 나타나지 않는다. 이를 통해서 3가지 타입 모두에서 Multi-layer의 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그래서 이것이 실제 실험에서 어떻게 나타나는지를 다음 장에서 설명한다.

### 5.3 전체 두께(D2)의 변화와 타입에 따른 공진 변화(실제 실험)

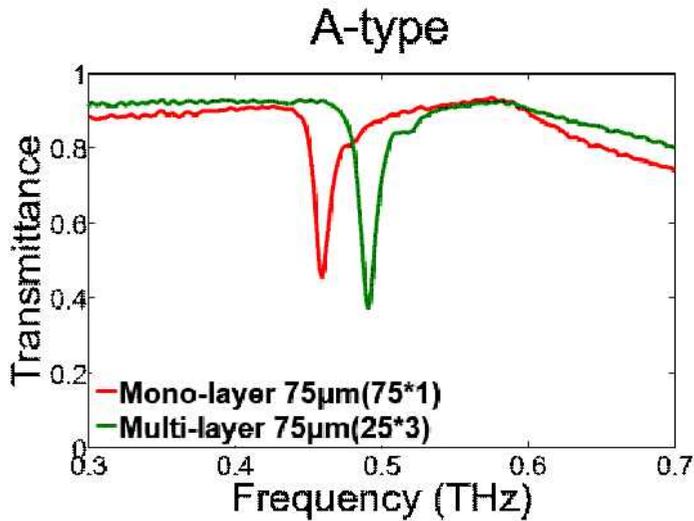


그림 5.3 (a) A-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu\text{m}$ 일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

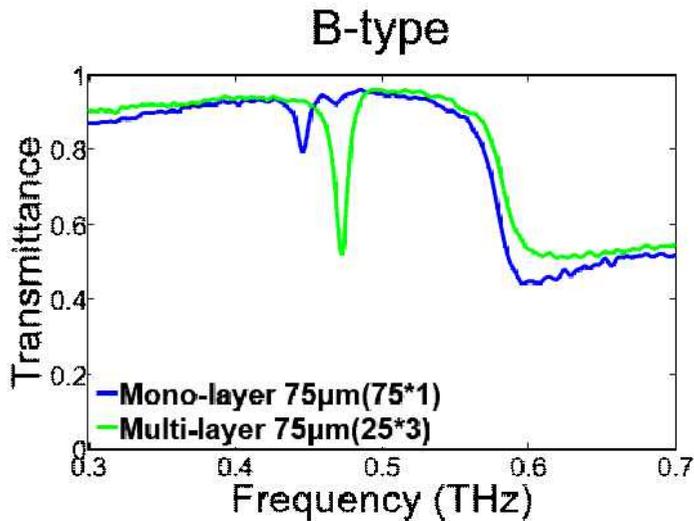


그림 5.3 (b) B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu\text{m}$ 일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

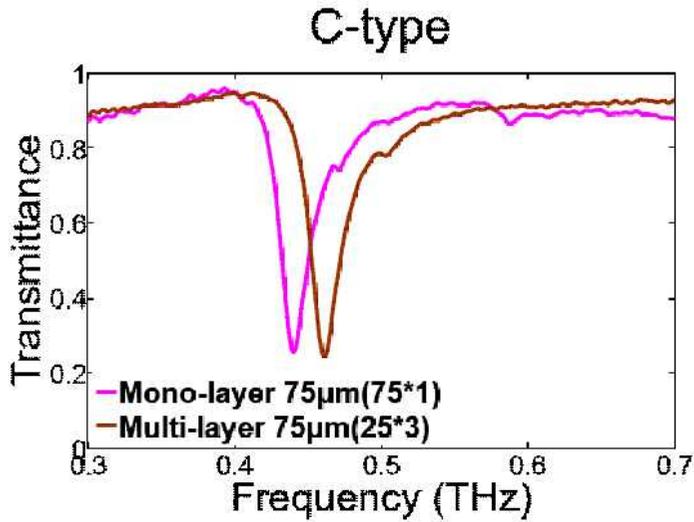


그림 5.3 (C) C-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 75µm일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

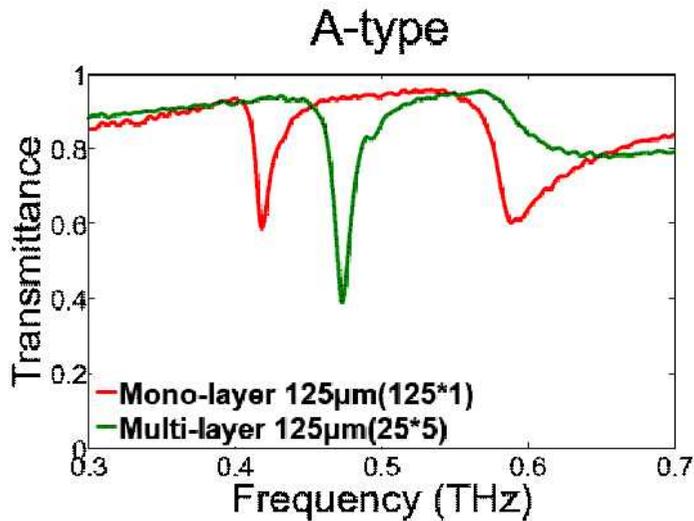


그림 5.3 (d) A-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125µm일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

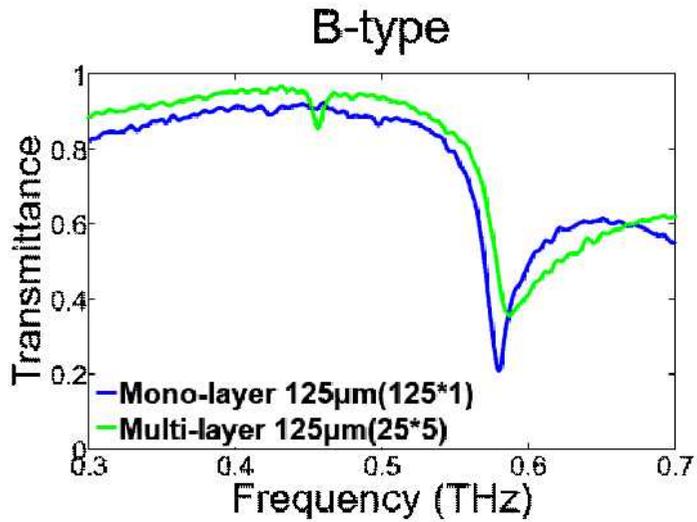


그림 5.3 (e) B-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125µm일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

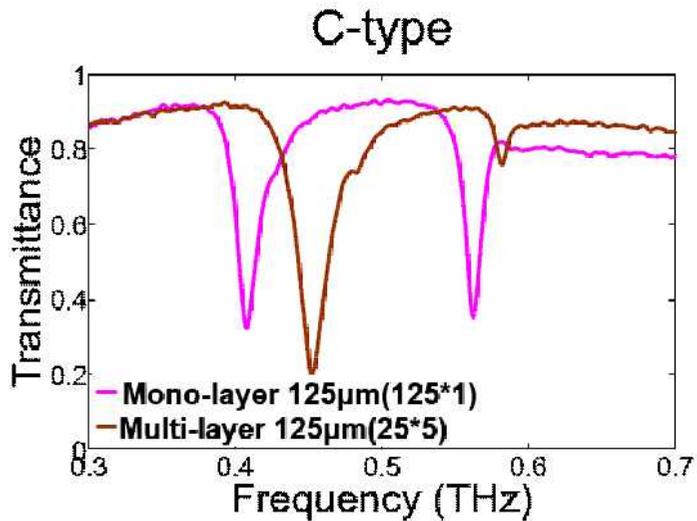


그림 5.3 (f) C-type에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125µm일 때 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance

그림 5.3(a), (b), (c)는 PET film의 전체 두께(D2)가 75 $\mu\text{m}$ (각층의 두께(D)는 25  $\mu\text{m}$ )일 때 각각의 타입에 따라서 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance를 보여주는 그래프이다. 따라서 이 그래프들을 시뮬레이션 결과인 그림 4.1(a), (b), 그림 5.2(a), (b), (c), (d)와 함께 비교할 수 있다.

A-type인 그림 5.3(a)는 Multi-layer일 때 공진의 크기가 Mono-layer일 때 보다 더 커지고 고주파수 방향으로 위치가 이동한 것을 알 수 있다. 이것은 그림 3.3에서 보여줬던 실제 실험에서 Multi-layer가 적용된 효과가 잘 나타나는 것을 다시 한번 보여준다. 그리고 실제 실험결과인 그림 5.3(a)와 FDFD 시뮬레이션 결과인 그림 4.1(a), (b)를 서로 비교해보면 Mono-layer일 때의 공진의 위치와 Multi-layer일 때의 공진의 위치 또한 잘 맞는다는 것을 알 수 있다.

B-type인 그림 5.3(b) 또한 그림 5.3(a)가 그랬던 것처럼 Multi-layer를 적용했을 때 공진의 크기가 더 커지고 공진의 위치가 고주파수 방향으로 이동한 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 5.3(b)에 대응하는 FDFD 시뮬레이션 결과인 그림 5.2(a), (b)와도 잘 일치한다. 여기에서 A-type인 그림 5.3(a)와 B-type인 그림 5.3(b)의 다른 점은 Mono-layer일 때 공진의 크기가 B-type이 A-type보다 상당히 작고 Multi-layer를 적용시켰을 때 향상되는 공진의 깊이는 B-type이 A-type보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

C-type인 그림 5.3(c)의 경우 Multi-layer를 적용시켰을 때 공진의 위치는 고주파수 방향으로 이동 했지만 공진의 깊이가 향상되는 것은 거의 보이지 않는다. 하지만 Mono-layer일 때의 공진의 깊이는 A-type이나 B-type보다도 더 크다.

이렇게 타입에 따라서 다른 결과가 나온 것은 그림 5.1(a), (b)에서 언급된 내용과 같이 각각의 타입에 따른 공진의 Q-factor가 다르기 때문이다. B-type의 경우 그림 5.2(a)의 시뮬레이션에서 확인된 것처럼 PET film의 전체 두께가 같은 조건에서 공진의 Q-factor가 가장 크게 나타난다. 이렇게 되면 공진의 Q-factor가 큰 만큼 물질에 의한 loss의 영향을 크게 받아서 투과된 THz파의

스펙트럼에서 나타나는 공진의 깊이가 줄어든다. 그래서 B-type인 그림 5.3(b)의 Mono-layer일 때 공진의 깊이가 다른 타입과 비교해서 가장 작은 것이다. 하지만 Multi-layer를 적용했을 때는 마찬가지로 물질에 의해 loss가 줄어드는 영향을 더 크게 받아서 다른 타입과 비교하면 향상되는 공진의 크기가 더 큰 것이다. 반대로 C-type인 그림 5.3(c)의 경우 그림 5.2(a)의 시뮬레이션과 같이 PET film의 전체 두께가 같은 조건에서 공진의 Q-factor가 가장 작게 나타난다. 그래서 앞서 언급한 이유로 인하여 다른 타입과 비교해서 Mono-layer일 때 공진의 깊이가 가장 큰 것이다. 하지만 Multi-layer를 적용했을 때는 애초에 물질에 의한 loss의 영향 크게 받지 않았기 때문에 향상되는 공진의 크기도 매우 작거나 거의 보이지 않는 것이다.

그림 5.3(d), (e), (f)는 PET film의 전체 두께(D2)가 그림 5.3(a), (b), (c)보다 50  $\mu\text{m}$  늘어난 125  $\mu\text{m}$ 일 때 각각의 타입에 따라서 Mono-layer와 Multi-layer의 Transmittance를 보여주는 그래프이다. 즉 그림 5.3(a), (b), (c)의 실험 조건에서 PET film의 전체 두께(D2)만 50  $\mu\text{m}$  늘어나고 나머지 조건은 같은 상황이다. 그래서 이 그래프도 마찬가지로 시뮬레이션 결과인 그림 4.1(a), (b), 그림 5.2(a), (b), (c), (d)와 함께 비교할 수 있다.

A-type인 그림 5.3(d)에서 Mono-layer일 때를 그림 4.1(a)와 비교해보면 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )이 나타난 위치가 서로 비슷한 것을 알 수 있다. 그리고 0.6 THz 부근에서 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ ) 부근과 rayleigh anomaly 경계[39, 40]가 겹쳐지기 때문에 Transmittance가 왜곡되어 보이는 것 또한 그림 4.1(a)와 서로 비슷하다. 그림 5.3(d)에서 Multi-layer일 때는 예상대로 Mono-layer일 때보다 공진의 크기가 향상되고 공진의 위치가 고주파수 방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 공진의 위치가 이동한 것은 그림 4.1(b)와 잘 맞는다. 그리고 그림 4.1(b)에서 PET film의 전체 두께(D2)가 125  $\mu\text{m}$ 일 때 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )이 없는 것과 동일하게 그림 5.3(d)에서 Multi-layer일 때 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )이 사라진 것을 볼 수 있다. 결과적으로 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

B-type인 그림 5.3(e)는 Mono-layer일 때 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )이 FDFD 시뮬레이션인 그림 5.2(a)의  $125\mu\text{m}$ 와 마찬가지로 Q-factor가 너무 높아서 나오지 않는 것을 잘 보여준다. Multi-layer일 때 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )은 그림 5.2(b)에서의 대응 하는 위치와 잘 맞는다는 것 알 수 있다. 하지만 B-type의 경우 향상되는 공진의 크기가 3가지 타입 중에서 가장 커야 하지만 오히려 가장 작아야 하는 C-type보다도 더 작은 것을 알 수 있다. 이것은 PET film의 전체 두께(D2)가  $125\mu\text{m}$ 일 때는 이미 물질에 의한 loss가 매우 커서 Multi-layer를 적용시킨다 하더라도 물질에 의한 loss 여전히 크기 때문이다. 그래서 결과적으로 공진의 향상이 매우 작은 것이다. 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )은 그림 5.2(a), (b)에서 보면 PET film의 전체 두께(D2)가  $125\mu\text{m}$ 인 상황에서는 Mono-layer일 때와 Multi-layer일 때 모두 rayleigh anomaly 경계와 겹쳐지는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 5.3(e)와 서로 잘 맞는다.

C-type인 그림 5.3(f) 또한 그에 해당하는 FDFD 시뮬레이션인 그림 5.2(c), (d)와 함께 비교해보면 첫 번째 공진( $TE_{0,1}$ )의 위치가 서로 비슷하고 Multi-layer일 때 공진의 크기가 향상된 것을 볼 수 있다. Mono-layer일 때 두 번째 공진인 ( $TE_{1,1}$ )은 FDFD 시뮬레이션인 그림 5.2(c)에서 보면 rayleigh anomaly 경계 보다 약간 왼쪽에 있는 것으로 보이는데 이것이 실제 실험인 그림 5.3(f)에서 확연하게 구분되어 나타나 있다. 그리고 Multi-layer일 때 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )은 FDFD 시뮬레이션인 그림 5.2(d)에서 보이듯이  $125\mu\text{m}$ 일 때는 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이것 또한 실제 실험인 그림 5.3(f)에서 Mono-layer일 때와 비교해서 확연하게 줄어든 두 번째 공진( $TE_{1,1}$ )을 볼 수 있어서 서로 잘 맞는 것을 알 수 있다.

결과적으로 앞선 그림 5.3(a), (b), (c)와 그림 5.3(d), (e), (f) 모두 FDFD 시뮬레이션 결과인 그림 4.1(a), (b), 그림 5.2(a), (b), (c), (d)와 서로 잘 일치한다고 볼 수 있다. 지금까지의 결과를 종합적으로 분석하면 Mono-layer를 적용하면 공진의 깊이가 향상되고 공진의 위가 바뀌는 효과가 있는 것은 사실이다. 특히 B-type의 경우 다른 타입과 비교해서 Q-factor가 가장 높은 구조이기 때문에

Multi-layer를 적용시켰을 때 더욱더 큰 Q-factor를 가지게 할 수 있다. 하지만 단점으로 B-type은 Q-factor가 너무 커서 PET film의 전체 두께(D2)가 125 $\mu$ m 이상이 되면 필터의 물질에 의한 THz파의 손실이 너무 커지게 된다. 그래서 Multi-layer를 적용한다고 해도 여전히 손실이 너무 큰 상태이기 때문에 공진의 깊이 향상을 기대할 수 없다. 따라서 B-type에 Multi-layer를 적용할 때는 THz 파의 손실을 줄이기 위해 가능한 낮은 두께를 선택하는 것이 좋다. 그리고 B-type과는 반대로 C-type은 가장 낮은 Q-factor를 가지기 때문에 필터의 물질에 의한 THz파의 손실로부터 비교적 영향을 조금 받는다. 하지만 Multi-layer일 때 손실이 적었던 만큼 Multi-layer를 적용했을 때 향상되는 공진의 깊이가 작다는 단점이 있다. A-type은 Q-factor가 B-type과 C-type의 사이에 있기 때문에 특성 또한 B-type과 C-type의 사이에 있다. 따라서 각각의 타입에 대한 특성을 알고 적절하게 이용하는 것이 좋다.

## 제 6 장 결 론

마이크로 영역이나 광학 영역에서 주로 이용되어 오던 GMR(Guided Mode Resonance)은 최근 들어서 THz 영역에서 작동하는 GMR 필터가 개발되었다. 이 제안된 GMR 필터는 slab wave guide 위에 grating을 결합한 형태인데 높은 Q-factor를 가진다는 장점이 있다. 이 GMR 필터는 필터의 물질에 의해서 입사되는 THz파의 손실이 커지면 투과된 파의 스펙트럼에서 나타나는 공진의 깊이가 작아져서 Q-factor가 낮아지는 단점을 가지고 있다. 즉 물질에 의한 손실이 커지면 GMR 필터의 장점인 높은 Q-factor가 사라지게 되는 것이다. 그래서 본 논문에서는 slab wave guide에 Multi-layer를 적용시켜서 기존의 Mono-layer일 때의 손실을 줄이고자 했다.

Multi-layer를 FDFD 시뮬레이션으로 적용시켜 보니 Multi-layer의 숫자가 늘어날수록 slab wave guide의 평균 굴절률이 줄어들고 공진의 위치가 고주파수 방향을 이동한다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 또 다른 시뮬레이션의 결과로써 필터의 물질에 의한 입사파의 손실이 커지면 공진의 깊이가 줄어든다는 사실을 알 수 있었고 여기에 Multi-layer를 적용하면 평균 굴절률이 낮아지므로 손실이 줄어들어 감소된 공진의 깊이를 보상할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

그래서 본 논문에서는 GMR을 세 가지 타입을 나누어서 실험해 보았다. 일반적인 GMR인 A-type과 약간의 변화를 준 B-type과 C-type은 시뮬레이션 결과 같은 PET film(slab wave guide)의 두께를 기준(실제 실험이 이루어지는 75  $\mu\text{m}$ ~225 $\mu\text{m}$  사이의 두께)으로 B-type의 Q-factor가 가장 높고 그다음이 A-type이고 가장 작은 것이 C-type이다.

이것을 실제 실험한 결과와 비교해보니 Multi-layer를 적용시켰을 때 공진의 위치가 고주파수 방향으로 이동하는 것과 공진의 깊이가 향상되는 것이 서로 잘 맞았다. 여기에서 Mono-layer일 때의 공진의 깊이와 Mono-layer를 적용했을

때 공진의 깊이가 향상되는 크기가 각각의 타입에 따라 다른 것을 확인할 수 있었다. 그래서 시뮬레이션 상에서 Mono-layer일 때 Q-factor가 가장 큰 B-type은 필터의 물질에 의한 손실의 영향을 크게 받아서 실제 실험에서 Mono-layer일 때 공진의 깊이가 가장 낮았다. 하지만 Multi-layer를 적용시켰을 때 향상되는 공진의 크기는 그만큼 보상된 손실의 영향을 많이 받아 가장 컸다. 그와는 반대로 시뮬레이션 상에서 Mono-layer일 때 Q-factor가 가장 작은 C-type은 필터의 물질에 의한 손실의 영향을 그만큼 작게 받아서 실제 실험에서 Mono-layer일 때 공진의 깊이가 가장 깊었다. 하지만 Multi-layer를 적용시켰을 때는 이미 손실의 영향을 적게 받았기 때문에 보상된 손실도 적어서 향상되는 공진의 크기가 가장 작았다.

이렇게 구조에 따라서 공진의 깊이와 Multi-layer를 적용시켰을 때 향상되는 공진의 크기가 다르기 때문에 GMR 필터의 성능 향상을 위해서는 적절한 타입을 선택하는 것이 중요하다. 이를 적절히 활용한다면 보다 나은 성능의 GMR 필터를 비교적 간단히 만들 수 있다.

## 참고문헌

- [1] A.I. Hernandez-Serrano, Rajind Mendis, Kimberly S. Reichel, Wei Zhang, E. Castro-Camus, and Daniel M. Mittleman, "Artificial dielectric stepped-refractive-index lens for the terahertz region," *Opt. Express* 26, 3702-3708 (2018)
- [2] Gaochao Zhou, Penghui Dai, Jingbo Wu, Biaobing Jin, Qiye Wen, Guanghao Zhu, Ze Shen, Caihong Zhang, Lin Kang, Weiwei Xu, Jian Chen, and Peiheng Wu, "Broadband and high modulation-depth THz modulator using low bias controlled VO<sub>2</sub>-integrated metasurface," *Opt. Express* 25, 17322-17328 (2017)
- [3] D. Turchinovich, A. Kammoun, P. Knobloch, T Dobbertin, and M. Koch, "Flexible All-Plastic Mirrors for the THz Range," *Appl. Phys. A* 74, 291-293 (2002).
- [4] J. He, P. Liu, Y. He, and Z. Hong, "Narrow bandpass tunable terahertz filter based on photonic crystal cavity," *Appl. Opt.* 51, 776-779 (2012).
- [5] Benedikt Scherger, Christian Jördens, and Martin Koch, "Variable-focus terahertz lens," *Opt. Express* 19, 4528-4535 (2011)
- [6] S. Tibuleac and R. Magnusson, "Reflection and transmission guided-mode resonance filters," *J. Opt. Soc. Am. A* 14(7), 1617-1626 (1997)
- [7] S. S. Wang and R. Magnusson, "Theory and applications of guided-mode resonance filters," *Appl. Opt.* 32, 2606-2613 (1993).
- [8] L. Shi, P. Pottier, Y. A. Peter, and M. Skorobogatiy, "Guided-mode resonance photonic crystal slab sensors based on bead monolayer geometry," *Opt. Express* 16(22), 17962-17971 (2008).
- [9] R. Magnusson, D. Shin, and Z. S. Liu, "Guided-mode resonance Brewster filter," *Opt. Lett.* 23, 612-614 (1998).
- [10] K. J. Lee, R. LaComb, B. Britton, M. Shokooh Saremi, H. Silva, E. Donkor, Y. Ding, and R. Magnusson, "Silicon-layer guided-mode resonance polarizer with 40-nm bandwidth," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20(22), 1857-1859 (2008).
- [11] H. S. Bark, G. J. Kim, and T.-I. Jeon, "Transmission characteristics of all-dielectric guided-mode resonance filter in the THz region," *Sci. Rep.* 8(1), 13570 (2018).
- [12] H. S. Bark and T.-I. Jeon, "Tunable terahertz guided-mode resonance filter with a variable grating period," *Opt. Express* 26(22), 29353-29362

(2018).

[13] H. S. Bark and T.-I. Jeon, "Dielectric film sensing with TE mode of terahertz guided-mode resonance," *Opt. Express* 26(26), 34547-34556 (2018).

[14] K. L. Chopra, Shiv K. Sharma, V.N. Yadava, "Equivalent refractive index of multilayer films of different materials," *This Solid Films* 20(2), 209-215(1974).

[15] N. R. Han, Z. C. Chen, C. S. Lim, B. Ng, and M. H. Hong, "Broadband multi-layer terahertz metamaterials fabrication and characterization on flexible substrates," *Opt. Express* 19(8), 6990-6998(2011).

[16] Lanju Liang, Biaobing Jin, Jingbo Wu, Yi Huang, Zhihui Ye, Xiaoming Huang, Dong Zhou, Guosheng Wang, Xiaoqing Jia, Hai Lu, Lin Kang, Weiwei Xu, Jian Chen, Peiheng Wu, "A flexible wideband bandpass terahertz filter using multi-layer metamaterials," *Appl. Phys. B* 113(2), 285-290(2013)

[17] M.H. Asghar, M.B. Khan, S. Naseem, "Modeling thin film multilayer broad-band-pass filters in visible spectrum," *Czech. J. Phys.* 53(12), 1209-1217 (2003)

[18] Alfred Thelen, "Multilayer filters with wide transmittance bands," *J. Opt. Soc. Am.* 53(11), 1266-1270 (1963).

[19] Q. Qin, H. Lu, S. N. Zhu, C. S. Yuan, Y. Y. Zhu, and N. B. Ming, "Resonance transmission modes in dual-periodical dielectric multilayer films," *Appl. Phys. Lett.* 82(26), 4654-4656 (2003)

[20] Muhammad Amin, Mohamed Farhat, and Hakan Bağcı, "An ultra-broadband multilayered graphene absorber," *Opt. Express* 21(24), 29938-29948(2013).

[21] X. He, S. Yan, Q. Ma, Q. Zhang, P. Jia, F. Wu, and J. Jiang, "Broadband and polarization-insensitive terahertz absorber based on multilayer metamaterials," *Opt. Commun.* 340, 44-49 (2015).

[22] M. J. Asi and N. I. Dib, "Design of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization," *Prog. Electron. Res. B* 26, 101-113(2010).

[23] L. Jiang, J. Cui, L. Shi, X. Li, "Pareto optimal design of multilayer microwave absorbers for wide-angle incidence using genetic algorithms," *IET Microw. Antennas Propag.* 3(4), 572-579(2009)

[24] J. Grant, Y. Ma, S. Saha, A. Khalid, and D. R. S. Cumming, "Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber," *Opt. Lett.* 36(17),

3476–3478 (2011).

[25] Zhaoxian Su, Jianbo Yin, and Xiaopeng Zhao, “Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF<sub>2</sub> multilayer structures,” *Opt. Express* 23(2), 1679–1690 (2015).

[26] B. X. Wang, L. L. Wang, G. Z. Wang, W. Q. Huang, X. F. Li, and X. Zhai, “Theoretical investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber,” *IEEE Photo. Techno. Lett.* 26(2), 111–114 (2014).

[27] Y. Danlée, I. Huynen, and C. Bailly, “Thin smart multilayer microwave absorber based on hybrid structure of polymer and carbon nanotubes,” *Appl. Phys. Lett.* 100(21), 213105 (2012).

[28] Konstantin V. Popov, J. A. Dobrowolski, Alexander V. Tikhonravov, and Brian T. Sullivan, “Broadband high-reflection multilayer coatings at oblique angles of incidence,” *Appl. Opt.* 36(10), 2139–2151 (1997)

[29] C.C. Trapalis, M.A. Karakassides, G. Kordas, X. Aslanoglou, “Study of a multilayer wavelength-selective reflector prepared by the sol-gel process,” *Mater. Lett.* 25(5–6), 265–269 (1995)

[30] Eberhard Spiller, “Reflective multilayer coatings for the far uv region,” *Appl. Opt.* 15(10), 2333–2338 (1976).

[31] Feng Zhan, Zhipeng Li, Xiaoming Shen, Huan He, and Jianmin Zeng, “Design multilayer antireflection coatings for terrestrial solar cells,” *Sci. World J.* 2014, 5 (2014)

[32] M. Schubert, F. Mont, S. Chhajed, D. Poxson, J. Kim, and E. Schubert, “Design of multilayer antireflection coatings made from co-sputtered and low-refractive-index materials by genetic algorithm,” *Opt. Express* 16(8), 5290–5298 (2008).

[33] H. Ganesha Shanbhogue, C. L. Nagendra, M. N. Annapurna, S. Ajith Kumar, and G. K. M. Thutupalli, “Multilayer antireflection coatings for the visible and near-infrared regions,” *Appl. Opt.* 36(25), 6339–6351 (1997).

[34] K. Rabinovitch and A. Pagis, “Multilayer antireflection coatings: theoretical model and design parameters,” *Appl. Opt.* 14(6), 1326–1334 (1975)

[35] K. KOC, F. Z. Tepehan, G. G. Tepehan, “Antireflecting coating from Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and SiO<sub>2</sub> multilayer films,” *J. Mater. Sci.* 40(6), 1363–1366 (2005).

[36] Tomonari Ogata, Ryohei Yagi, Nozomi Nakamura, Yutaka Kuwahara, and Seiji Kurihara, “Modulation of Polymer Refractive Indices with Diamond Nanoparticles for Metal-Free Multilayer Film Mirrors,” *ACS Appl. Mater.* 4(8),

3769–3772 (2012).

[37] L. Li and J. A. Dobrowolski, “Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter,” *Appl. Opt.* 35(13), 2221–2225 (1996).

[38] S. Colodrero, M. Ocana, and H. Míguez, “Nanoparticle-based one-dimensional photonic crystals,” *Langmuir* 24, 4430–4434 (2008).

[39] Rayleigh, L. On the dynamical theory of gratings. *Royal Soc.* 79, 399–416 (1907).

[40] Anubm, N. S., Jae, W. Y. & Magnusson, R. Optical transmission filters with coexisting guided-mode resonance and rayleigh anomaly. *Appl. Phys. Lett.* 103, 131106 (2013).