



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

경사진 평행 도파로를 이용한 THz
TEM-모드의 전파특성 향상에 관한 연구

Improvement of propagation property of THz
TEM-mode using tapered parallel plate waveguide

 지도교수 전태인

2010년 02월

한국해양대학교 대학원

전기전자공학과

김 상 훈

本 論 文 을 金 相 勳 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 장 낙 원



위원 전 태 인



위원 서 동 환



2009 년 12 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

목 차

Abstract

| | |
|--|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 1. 1 테라헤르츠파 | 1 |
| 1. 2 경사진 평행 도파로(TPPWG) | 2 |
| 제 2 장 도파로 구조 및 실험 장치도 | 4 |
| 2. 1 PPWG 및 TPPWG 구조 | 4 |
| 2. 2 실험장치도 | 6 |
| 제 3 장 경사진 도파로의 전파특성 | 8 |
| 3. 1 평행판 도파로 전파 | 8 |
| 3. 1. 1 TM_0 (TEM) 단일모드 | 8 |
| 3. 1. 2 평행판 도파로 전파손실 | 13 |
| 3. 2 경사각에 따른 one-sided TPPWG 전파특성 | 16 |
| 3. 3 경계면이 등근 one-sided TPPWG | 19 |
| 3. 4 Two-sided TPPWG 전파특성 | 21 |
| 3. 4. 1 Two-sided TPPWG 구조 | 21 |
| 3. 4. 2 입사 방향에 따른 one-sided TPPWG 전파 | 23 |
| 3. 4. 3 Two-sided TPPWG 전파 | 25 |
| 제 4 장 THz 표면 플라즈몬 | 28 |
| 4. 1 표면 플라즈몬(Surface Plasmon) | 28 |

| | |
|---------------------------------------|--------|
| 4. 2 실험장치 및 구조 | 29 |
| 4. 3 PPWG를 이용한 THz SP의 결합 | 32 |
| 4. 4 금속 표면 구조에 따른 THz SP의 결합 특징 | 33 |
| 4. 4. 1 Vertical Groove | 33 |
| 4. 4. 2 Horizontal Groove | 35 |
| 4. 4. 3 Check Groove | 37 |
| 제 5 장 결 론 | 40 |
| 참 고 문 헌 | 42 |



그림 목 차

| | | |
|--------|---|----|
| 그림 1.1 | 전자기파의 스펙트럼 | 1 |
| 그림 2.1 | (a) 실리콘 렌즈 | 5 |
| | (b) PPWG | 5 |
| | (c) One-sided TPPWG | 5 |
| | (d) Round one-sided TPPWG | 5 |
| | (e) Two-sided TPPWG | 5 |
| 그림 2.2 | 실험장치도 | 6 |
| 그림 3.1 | 100 μ m gap PPWG의 흡수율 및 위상속도/군속도 그래프 | 12 |
| 그림 3.2 | (a) PPWG의 THz 파 시간영역 그래프 | 15 |
| | (b) PPWG의 THz 파 주파수영역 그래프 | 15 |
| 그림 3.3 | (a) 경사각에 따른 one-sided TPPWG THz 파 시간영역 그래프 | 17 |
| | (b) 경사각에 따른 one-sided TPPWG THz 파 주파수영역 그래프 | 18 |
| | (c) 경사각에 따른 one-sided TPPWG Peak to Peak 곡선 | 18 |
| 그림 3.4 | (a) 10° round TPPWG, non-round TPPWG THz 파 시간영역 그래프 | 20 |
| | (b) 10° round TPPWG, non-round TPPWG THz 파 주파수영역 그래프 | 20 |
| 그림 3.5 | (a) left-, right- one-sided TPPWG THz 파 시간영역 그래프 | 24 |
| | (b) left-, right- one-sided TPPWG THz 파 주파수영역 그래프 | 24 |
| 그림 3.6 | (a) two/one-sided TPPWG, PPWG THz 파의 시간영역 그래프 | 26 |
| | (b) two/one-sided TPPWG, PPWG THz 파의 주파수영역 | |

| | | |
|--------|--|----|
| | 그래프 | 27 |
| | (c) reference \times a 의 ratio | 27 |
| 그림 4.1 | (a) 실험장치도 | 30 |
| | (b) 금속 sheet | 30 |
| | (c) 도파로를 이용한 TSP 결합 장치 | 30 |
| 그림 4.2 | (a) Vertical groove 알루미늄 sheet | 31 |
| | (b) Horizontal groove 알루미늄 sheet | 31 |
| | (c) Check groove 알루미늄 sheet | 31 |
| 그림 4.3 | 검출된 TSP 시간영역 그래프 | 32 |
| 그림 4.4 | (a) Vertical groove의 TSP 시간영역 그래프 | 34 |
| | (b) Vertical groove의 TSP 주파수영역 그래프 | 34 |
| 그림 4.5 | (a) Horizontal groove의 TSP 시간영역 그래프 | 36 |
| | (b) Horizontal groove의 TSP 주파수영역 그래프 | 36 |
| 그림 4.6 | (a) Check groove의 TSP 시간영역 그래프 | 38 |
| | (b) Check groove의 TSP 주파수영역 그래프 | 38 |
| 그림 4.7 | (a) Groove 간격이 1mm 일 때 주파수영역 그래프 | 39 |
| | (b) Groove 간격이 1mm 일 때 주파수영역 그래프 | 39 |

Improvement of propagation property of THz TEM-mode using tapered parallel plate waveguide

Sang-Hoon Kim

Department of Electrical and Electronics Engineering

Graduate School of

Korea Maritime University

Abstract

This paper an experimental study of a tapered parallel-plate waveguide(TPPWG) to improve THz coupling to the plate separation gap. Propagating THz waves has a small absorptance and no group velocity dispersion in PPWG 100um gap. However about 30% reflection loss from si lens and has loss to the structure problem. This loss induces a low coupling efficient.

To prevent the reflection loss and to concentrate the THz beam on the air gap, of the plate separation the structure of the input side of the PPWG was changed a tapered structure. The five different slop angles of the tapered part-i.e., 20° , 15° , 10° , 5° , and 3° were used to get the THz pulses. As the slop angle of the TPPWG decreased, the amplitudes of the THz pulses were enhanced. Had the slop angle been smaller than 3° , the measured THz pulse would have been enhanced more.

When the input THz beam was incidence to one-sided TPPWG has a reflection on boundary surface. To reduce the reflection, boundary

surface made a changing round. When Compare The round TPPWG with non round TPPWG, increased by 15% at the peak to peak and was enhanced by 13% at the 1THz frequency.

And, the input-, output- side of the PPWG was changed a two-sided tapered structure. The peak to peak THz amplitude of the two-sided TPPWG improved by 138% compare with the PPWG. also improved by 38% compare with the one-sided TPPWG. The PPWG attenuation loss is considered, the two-sided TPPWG, the on-sided TPPWG and the PPWG had a respectively 56%, 42%, and 27% coupling.

Also, Use the PPWG and TPPWG, coupling improvement of TSP was generated on aluminum sheet. The improvement of TSP coupling the aluminum surface was done by the vertical-, horizontal-, and check grooves on the aluminum sheet with 50um thickness. The vertical and check grooves on the metal surface was 100% improved coupling efficient than that of the horizontal and smooth surfaces. Also, 0.5mm groove period had 100% improved coupling efficient compare with the 1.0mm groove period.

Although the amplitude of spectra to the vertical and check grooves was improved, the spectrum bandwidth was reduced compare with the horizontal and smooth surface.

제 1 장 서론

1. 1 테라헤르츠파

테라헤르츠(Terahertz: THz)파는 그림 1과 같이 마이크로웨이브와 광파의 중간영역에 위치하는 근 적외선영역의 전자기파이다. 0.1~10THz 정도의 주파수를 가지고 있으며 파장으로는 0.03~3mm, 에너지로는 0.4~40 meV 에 해당하는 영역으로, 과거 발생과 검출의 기술적 한계로 전자기파의 영역 중 유일하게 미지의 영역으로 남아 연구가 되지 않았다. 그러나 THz의 광원인 펨토초 레이저가 개발됨에 따라 발생과 검출이 가능해지고 최근에는 전 세계적으로 THz 대역에 관한 연구가 기초적인 학문으로서의 성격에서 벗어나 응용기술로 발전하고 있다.

THz 파 대역은 그림 1.1 과 같이 마이크로웨이브와 광파의 대역 중간에 위치하고 있어 빛의 직진성과 전자기파의 투과성을 모두 가지고 있으며, 마이크로파나 광파가 투과할 수 없는 물질을 쉽게 투과하고 수분에 잘 흡수되는 특성을 가지고 있기 때문에, 의학/의공학, 생화학/식품공학, 공해감시 및 보안검색 등의 산업에 점차 확장되고 중요성이 날로 증대되고 있다. 또한 THz 도파로, 필터, 공진기와 같은 수동소자의 활발한 연구로 이를 이용한 응용연구인 나노기술, 정보기술, 생명기술, 환경기술, 우주기술 및 군사기술 등 여러 기술 간의 융합기술 발전에 광범위하게 적용이 가능하다.

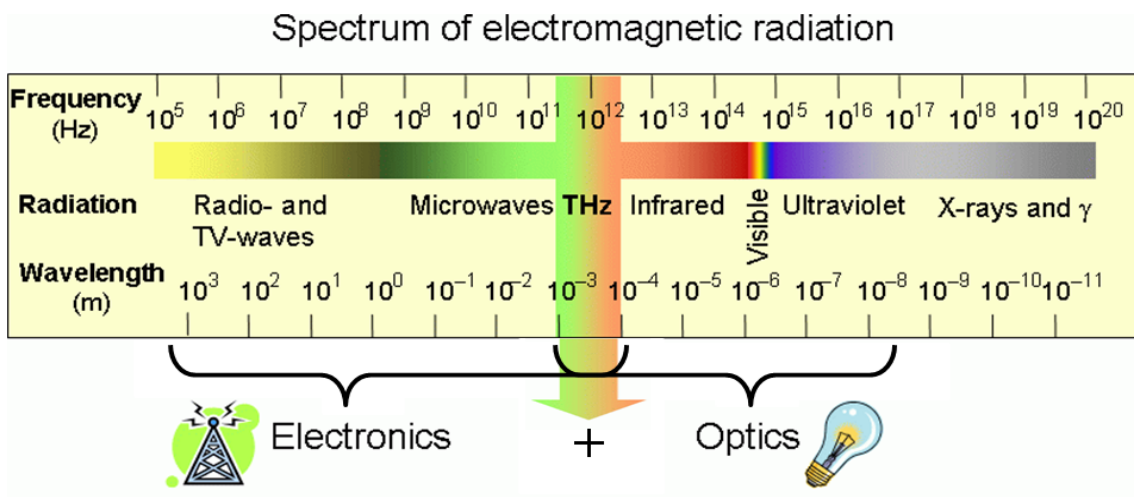


그림 1.1 전자기파의 스펙트럼

1. 2 경사진 평행 도파로(TPPWG)

최근에 THz 파의 발생광원인 펨토초 레이저가 개발되어 발생과 검출이 가능해지고, 전 세계적으로 THz 대역에 관한 연구가 학문으로서의 성격에서 벗어나 응용기술로 발전하고 있다. 실질적으로 THz 기술을 여러 분야에 응용하기 위해서는 THz 도파로, 분배기, 필터, 공진기와 같은 수동소자 개발이 필수적이며 THz 소자를 이용한 응용분야에서 매우 중요한 역할을 할 것이다. 특히 도파로의 경우 집적회로의 기판과 기판사이에서 근거리 전송과 장비들 간의 전송에 있어서 반드시 개발되어야 한다.

최근에 THz 영역에서의 수동소자로 단일 모드 전파가 가능한 원형 금속 도파로(circular metal waveguide)[1], 사각형 금속 도파로(rectangular metal waveguide)[2], 단결정 크리스탈 광섬유(single-crystal sapphire fibers)[3], 평면 전송선(transmission line)[4], 단일 금속선(single metal wire)[5,6], 동축케이블(coaxial cable)[7], 평행판 도파로(parallel-plate waveguide) 등이 보고되어 있으며 그중에서 평행판 도파로(Parallel-Plate Waveguide: PPWG)는 군속도 분산이 거의 없는 TEM 단일 모드의 전파 가능하며 평행판 사이에 THz 파의 에너지를 집속시킬 수 있다[8,9]. 특히, 분광학[10], 센싱 및 필터[11], super-prism[12] 및 Bragg resonances[13] 등에서 연구되었듯이 THz 영역에서 활용도가 가장 높은 도파로 이다.

이러한 PPWG 응용연구를 하기 위해서는 THz 파를 평행판 사이에 집속 시켜야 하며 또한 평행판에서 공기 중으로 방사 시켜야 한다. 이런 역할을 하기 위해 PPWG 앞과 뒤에 고저항의 원통형의 실리콘 렌즈(High resistivity cylindrical silicon lens)를 사용한다. 이 실리콘 렌즈는 THz 영역에서 일정한 굴절률과 낮은 흡수율을 가지며 THz 파의 집속 및 방사를 제어한다. 그러나 실리콘의 높은 굴절률과 인해 표면에서 30%의 반사 손실이 발생시켜 앞 뒤 두 개의 실리콘 렌즈를 사용하게 되므로 그 반사 손실은 50%에 달한다. 또한 실리콘 렌즈와 평행 도파로를 서로 밀착시켜 결합해야 하는데 이 과정에서 결합 손실이 발생한다. 이러한 손실을 보완하기 위해서 경사진 평행 도파로(Tapered Parallel-Plate Waveguide: TPPWG)를 제안하였다. 먼저 한쪽 면이 경사진 평행

도파로(이하: one-sided TPPWG)를 제안하였고, 이 구조에서 경사면과 평행면의 경계면을 둥글게 가공하여 그 전파특성을 향상 시켰다. 그리고 양쪽 면이 경사진 평행 도파로(이하: two-sided TPPWG)를 제안하여 그 전파특성을 one-sided TPPWG 보다 향상시켰다.

또한 PPWG와 TPPWG를 이용하여 금속판에 THz 표면 플라즈몬(Terahertz Surface Plasmon: TSP)의 결합을 시도하였다. TSP의 결합효율을 향상시키기 위해 금속판 표면에 주기적인 groove를 만들었다. 전파 진행방향에 따라 horizontal groove, vertical groove, check groove를 제작하여 표면 구조에 따라 TSP의 결합효율이 얼마나 향상되는지를 확인하였다.

본 논문에서는 이미 알려진 테라헤르츠 시간영역 분광법(Terahertz-time domain spectroscopy: THz-TDS) 시스템을 사용하여 one-side TPPWG, round one-sided TPPWG 및 two-sided TPPWG 의 TEM 단일모드 전파특성 향상을 실험적으로 확인하고, PPWG 와 TPPWG를 이용하여 금속판에 결합된 TSP를 결합 효율 향상을 실험적으로 확인하였다.



제 2 장 도파로 구조 및 실험 장치도

2. 1 PPWG 및 TPPWG 구조

실험에 사용된 도파로는 PPWG, one-sided TPPWG, round one-sided TPPWG, two-sided TPPWG 의 도파로를 제작하였다. 향상된 결과를 확인하기 위해 reference 로 PPWG를 사용하였으며 TPPWG 가 비교대상이다.

그림 2.1(a)은 고저항의 원통형 실리콘 렌즈로 THz 파의 영역에서 일정한 굴절률($n=3.418$)과 작은 흡수율($\alpha=0.05\text{cm}^{-1}$ 이하)로 THz 파의 집속과 방사위해 사용되었다[14]. 실리콘 렌즈는 높이 7.07mm, 반지름 5mm, 길이 15mm 이며 굴절률에 의한 THz 파가 집속되도록 최적의 규격으로 제작되었다.

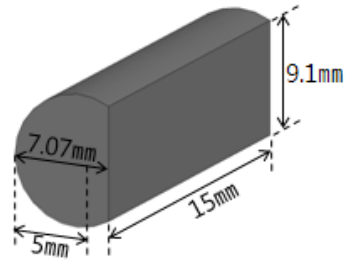
PPWG는 그림 2.1(b)와 같으며 재질은 알루미늄, 길이 30mm, 폭 30mm, 각각의 블록 두께는 10mm로 제작되었다. 또한 THz 파가 진행하는 면, 즉 서로 마주보는 블록 면은 기계적 가공에 의한 스크래치를 없애기 위해서 고풍택 금속연마제로 깨끗하게 연마(polishing)하였다. 그리고 THz 파를 평행판 사이의 $100\mu\text{m}$ 간격에 집속시키기 위하여 실리콘 렌즈를 좌측면과 우측면에 결합하였으며 렌즈를 부착할 때 평행판 사이의 간격과 렌즈의 중앙부분이 일치하도록 현미경을 통해 확인을 하면서 결합하였다. 또한 결합시 렌즈와 블록 사이에 미세한 공간이 생기지 않도록 블록과 렌즈에 양쪽으로 힘을 가하여 부착하였다.

그림 2.1(c)은 one-side TPPWG 구조이며 재질과 평행판 부분은 PPWG와 동일하게 하여 제작하였다. 그리고 한쪽 면을 경사지게 가공하여 각도에 따라 블록을 제작하였으며, 경사각 θ 는 3° , 5° , 10° , 15° , 20° 이고 마주보는 블록도 같은 각도로 제작하였다. 또한 서로마주보는 블록 면은 PPWG와 마찬가지로 표면을 깨끗하게 연마(polishing)하였고 경사가 없는 우측면도 PPWG와 동일한 조건을 만들기 위해 실리콘 렌즈를 같은 방법으로 결합하였다.

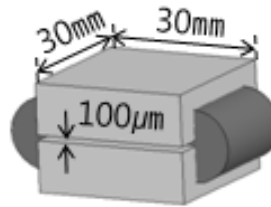
그림 2.1(d)는 one-sided TPPWG의 경계면을 확대한 것이며 경계면의 지름을 $80\mu\text{m}$ 의 지름을 가지는 원으로 가공하였다.

그림 2.1(e)는 two-sided TPPWG이며 one-sided TPPWG와 마찬가지로 재질은

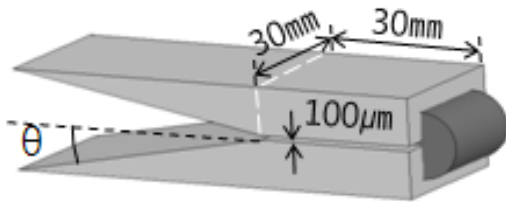
알루미늄, 길이와 폭을 동일하게 하여 제작하였다. 경사각 θ 는 3° 로 하였으며 서로 마주보는 표면 역시 깨끗하게 연마(polishing)하였다.



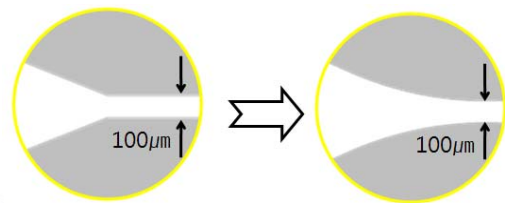
(a) 실리콘 렌즈



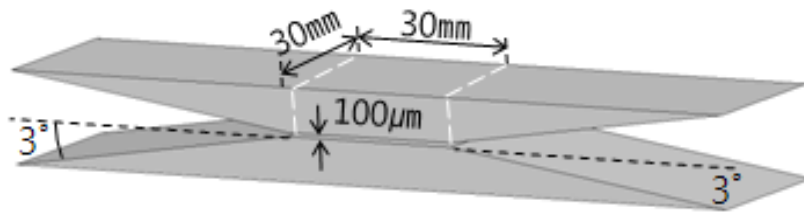
(b) PPWG



(c) One-sided TPPWG



(d) Round one-sided TPPWG



(e) Two-sided TPPWG

그림 2.1 (a) 실리콘 렌즈 (b) PPWG (c) One-sided TPPWG
(d) Round one-sided TPPWG (e) Two-sided TPPWG

2. 2 실험 장치도(THz-TDS system)

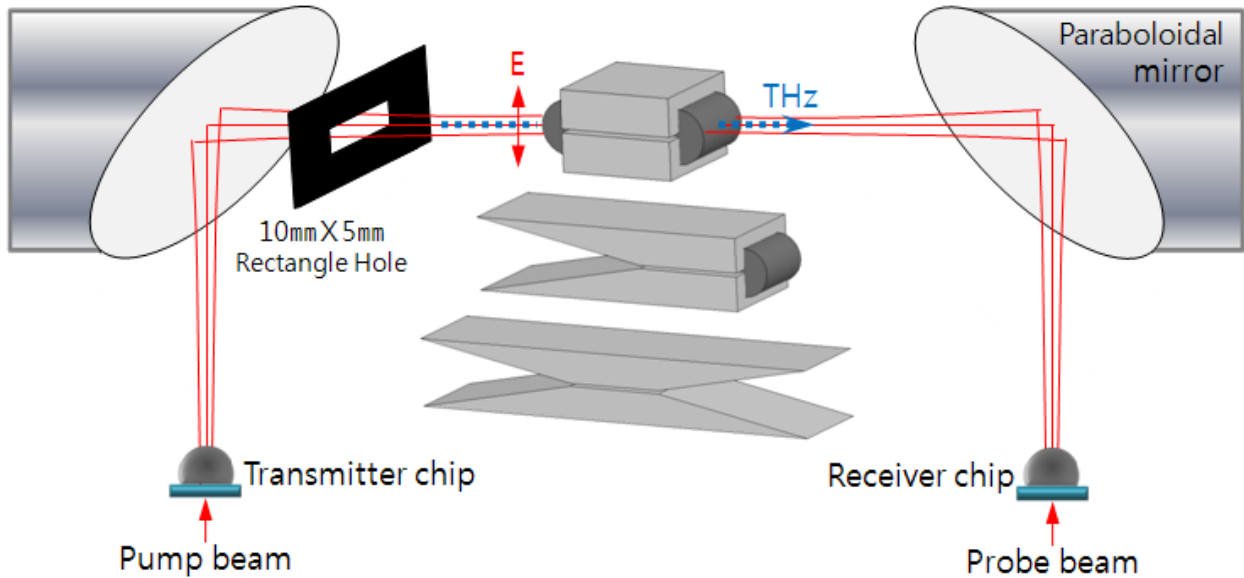


그림 2.2 실험장치도

그림 2.2는 실험에 사용된 일반적인 테라헤르츠 시간영역 분광법 시스템(THz-TDS system)이며 THz 파가 진행하는 두 parabolic mirror 사이에 도파로를 그림과 같이 위치시켜 실험을 진행하였다.

이 THz-TDS system 은 532nm의 파장을 가지고 최대 5W의 출력을 낼 수 있는 Diode Pumped CW 레이저가 mode-locked 된 Ti:Sapphire 펄스 레이저로 파장 800nm, 펄스폭 80fs, 반복률 83MHz을 가진다[15-17]. 이 발생된 레이저 빔은 beam splitter로 pump beam 과 probe beam 으로 나누어져 pump beam은 THz를 발생시키기 위해 송신기(transmitter chip, TX) 로 probe beam은 THz 파를 검출하기 위해 수신기(receiver chip: RX) 로 도달하게 되며 이때 두 빔의 경로 길이를 일치시켜 THz 펄스가 같은 시간에 수신기에 도달하게 한다. 이때 pump beam의 경로에 시간지연기(delay line)을 설치하여 pump beam의 길이를 조절하여 두 빔 사이의 시간적 차이를 이용해 THz파를 랩뷰 프로그램을 이용하여 스캐닝하면 THz 펄스파형을 얻을 수 있다.

TX는 저온 성장시킨 GaAs 기판위에 금속으로 라인폭 10 μ m, 두 라인의 간격

이 $80\mu\text{m}$ 인 coplanar 형태의 안테나 구조의 칩을 사용하였고 두 라인 양단에 80V의 전압을 걸어주어 pump beam을 (+) 전극에 위치시키면 THz 파가 안테나로부터 방사 하게 된다.

RX는 silicon on sapphire(SOS) 기판위에 라인폭 $10\mu\text{m}$, 두 라인 간격 $30\mu\text{m}$, 다이폴 사이의 간격이 $5\mu\text{m}$ 인 안테나 전극을 형성하고 probe beam을 조사하여 THz 파가 SOS 칩에 도달하여 미세전류 펄스가 발생하면 전류검출소자 lock-in amplifier에 의해 전류를 측정하여 간접적으로 THz파의 전계강도를 측정할 수 있다.



제 3 장 경사진 도파로의 전파특성

3. 1 평행판 도파로 전파

3. 1. 1 TM_0 (TEM) 단일모드

많은 전자기파 관련된 서적에는 다양한 도파로를 Maxwell equation을 이용하여 전파특성에 대해 해석하였는데 이때 우리는 모드(mode)라는 단어를 접할 수 있다. 이 모드는 어떤 구조물에서 특정 주파수의 에너지가 집중되는 형태를 말하며 그 종류로는 진행방향으로 전계와 자계의 성분이 없는 TEM(Transverse Electromagnetic), 진행방향으로 전계 성분이 있는 TM(Transverse Magnetic), 진행방향으로 자계 성분이 있는 TE(Transverse Electric) 구분된다.

두 개 이상의 도체로 구성된 전송선로는 TEM 모드가 존재할 수 있고 TM과 TE 모드가 존재할 수 있다. 본 논문에서는 이미 알려진 TEM 모드 전파가 가능한 PPWG의 향상시키는 연구를 진행하였으므로 이 장에서는 TEM 모드를 수식적으로 유도하여 흡수율과 군속도 분산의 특성을 알아보고 실험 데이터의 분석에 용이하도록 한다.

TEM 모드는 TM_0 모드 이므로 TM 모드에 대한 수식적 풀이를 이용하면 쉽게 접근이 가능하다. PPWG에 입사되는 전계의 방향이 금속 평행판에 수직일 때 Maxwell 방정식, 경계조건, 파동방정식에 의해 평행판 도파로 내부 공간 사이에는 오직 횡자계(Transverse Magnetic, 이하 TM) 모드만이 전파된다. 이 때, 자계는 전자파의 진행 방향(\hat{z})에 대해 횡방향 성분(H_y)만 존재하며 전계는 진행방향 성분(E_z)과 평행판에 수직인 성분(E_x)이 존재할 수 있다.

$$1) \text{ Faraday's law : } \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ ----- (1)}$$

식 (1)의 좌변을 정리하면

$$\begin{pmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & E_z \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial y} E_z \hat{x} + \left(\frac{\partial}{\partial z} E_x - \frac{\partial}{\partial x} E_z \right) \hat{y} - \frac{\partial}{\partial y} E_x \hat{z}, \left(\frac{\partial}{\partial y} E_z = 0 \right)$$

$$= \left(\frac{\partial}{\partial z} E_x - \frac{\partial}{\partial x} E_z \right) \hat{y} \text{ 이 되고}$$

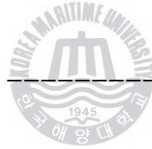
(평면파입사 때, 금속판의 폭이 평행판 사이의 간격보다 길다고 가정.

따라서, 금속판 좌우로 회절 되어 나가는 것을 무시하면 $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ 이 된다.)

우변을 정리하면 $-\frac{\partial B}{\partial t} = -j\omega\mu(H_y)\hat{y}$ 이 되어 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} E_x - \frac{\partial}{\partial x} E_z \right) = -j\omega\mu H_y \text{ ----- (2)}$$

$$2) \text{ Ampere's law : } \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \text{ ----- (3)}$$



식 (3)의 좌변을 정리하면

$$\begin{pmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & H_y & 0 \end{pmatrix} = -\frac{\partial}{\partial z} H_y \hat{x} + \frac{\partial}{\partial x} H_y \hat{z} \text{ 이 되고}$$

우변을 정리하면 $\frac{\partial D}{\partial t} = j\omega\epsilon(E_x\hat{x} + E_z\hat{z})$ 이 되어 식 (4), (5)를 얻을 수 있다.

$$-\frac{\partial}{\partial z} H_y = j\omega\epsilon E_x \text{ ----- (4)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} H_y = j\omega\epsilon E_z \text{ ----- (5)}$$

앞서 유도된 식 (4), (5)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (6) 파동 방정식 (wave equation)을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{1}{j\omega\epsilon}\frac{\partial}{\partial z}H_y\right)-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{j\omega\epsilon}\frac{\partial}{\partial x}H_y\right)\right)=-j\omega\mu H_y$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+\frac{\partial^2}{\partial x^2}+w^2\mu\epsilon\right)H_y=0 \quad \text{----- (6)}$$

3) 금속의 경계조건(Boundary Condition)

전계는 금속의 표면에서 접선 방향에 대해 연속인 경계 조건을 가지며 따라서 $x=0, x=d$ 일때 $E_z=0$ 이 된다. 식 (5)를 통해 E_z 의 경계 조건을 만족시키기 위한 H_y 는 식 (7)과 같은 형태가 될 수 있다.

$$H_y = A\cos(k_x x)e^{-k_z z}, \quad k_x = \frac{m\pi}{d} \quad (m=1,2,3) \quad \text{----- (7)}$$

$, k_z = \alpha + j\beta \quad (\alpha: \text{감쇠정수}, \beta: \text{위상정수})$

식 (7)를 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (8)를

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon}\frac{\partial}{\partial x}H_y = \frac{-k_x}{j\omega\epsilon}A\sin(k_x x)e^{-k_z z} \quad \text{----- (8)}$$

식 (7)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (9)를

$$E_x = -\frac{1}{j\omega\epsilon}\frac{\partial}{\partial z}H_y = \frac{k_z}{j\omega\epsilon}A\cos(k_x x)e^{-k_z z} \quad \text{----- (9)}$$

이로써, TM 모드 내 존재하는 E_x, E_z, H_y 필드 식을 모두 유도하였다.

4) 파동 방정식(wave equation)

앞서 유도된 식 (7)을 파동 방정식, 식 (6)에 대입, 정리하여 식 (10)을 얻을 수 있으며

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+\frac{\partial^2}{\partial x^2}+w^2\mu\epsilon\right)(A\cos(k_x x)e^{-k_z z})=0$$

$$(k_z^2 - k_x^2 + w^2\mu\epsilon)H_y = 0 \quad \text{----- (10)}$$

식 (10)을 통하여 식 (11)의 전파 상수 k_z 를 얻을 수 있다.

$$k_z = \sqrt{k_x^2 - w^2\mu\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{d}\right)^2 - w^2\mu\epsilon} \quad \text{----- (11)}$$

이 때, 전파 상수 $k_z=0$ 이 될 때, 차단 주파수 식 (12)가 되어

$$f_{c,m} = \frac{m}{2d} \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{-----} \quad (12)$$

각 모드, m 에 따른 차단 주파수 (f_c , cutoff frequency)를 구할 수 있다.

5) 차단주파수 $f_{c,m}$ 와 동작주파수 f 와 관계를 통해 위상속도 및 군속도를 구할 수 있다. 도파로 내, 모드에 따른 위상 속도 $v_{p,m}$ 는 식 (15)와 같다.

$$v_{p,m} = \frac{w}{k_{z,m}} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,m}}{f}\right)^2}} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c,m}}\right)^2}} \quad \text{-----} \quad (15)$$

위상 속도는 파가 진행 할 때 파의 일정한 위상 점의 속도를 의미함으로 위상 속도는 도파관 내에서 전파되는 에너지 속도를 나타내는 것이 아니다. 에너지는 아래 식 (16)에서 정의된 것처럼 파의 군속도(group velocity), $v_{g,m}$ 로 나타낼 수 있다.

$$v_{g,m} = \frac{1}{\frac{\partial k_{z,m}}{\partial w}} = v_p \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,m}}{f}\right)^2} = v_p \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c,m}}\right)^2} \quad \text{-----} \quad (16)$$

군속도 $v_{g,m}$ 는 동작 주파수가 차단 주파수 이상에서는 v_p 보다 작으며 차단 주파수 근처에서는 군속도가 0에 가까워진다. 따라서 도파로는 분산 (dispersive) 매질로써 작용하게 된다.

그리고 TEM 모드의 흡수율(absorption) 식 (17)은 N. Marcuvitz의 「Waveguide Handbook」 [19]을 참조하였다.

$$\alpha = \frac{1}{d} \frac{R}{\zeta} \text{ for TEM} \quad \text{-----} \quad (17)$$

R : 평행판의 전도도에 따른 저항 특성, ζ : 물질의 진성 임피던스

그림 3.1은 앞서 유도한식 (15) (16) (17) 을 이용해 이론적으로 $100\mu\text{m}$ gap 에 해당하는 PPWG의 흡수율과 위상 속도 군속도를 나타낸 그래프이다. 그래프 에서 보듯이 위상속도 및 군속도는 광속도로 전파하며 1~4 THz 영역에서 적은 흡수율을 가지는 것을 이론적으로 확인할 수 있다. 또한 실험을 통해서 PPWG 분산이 없고 손실이 거의 없는 TEM 단일 모드의 전파가 가능함을 실험적으로 확인하였다[18].

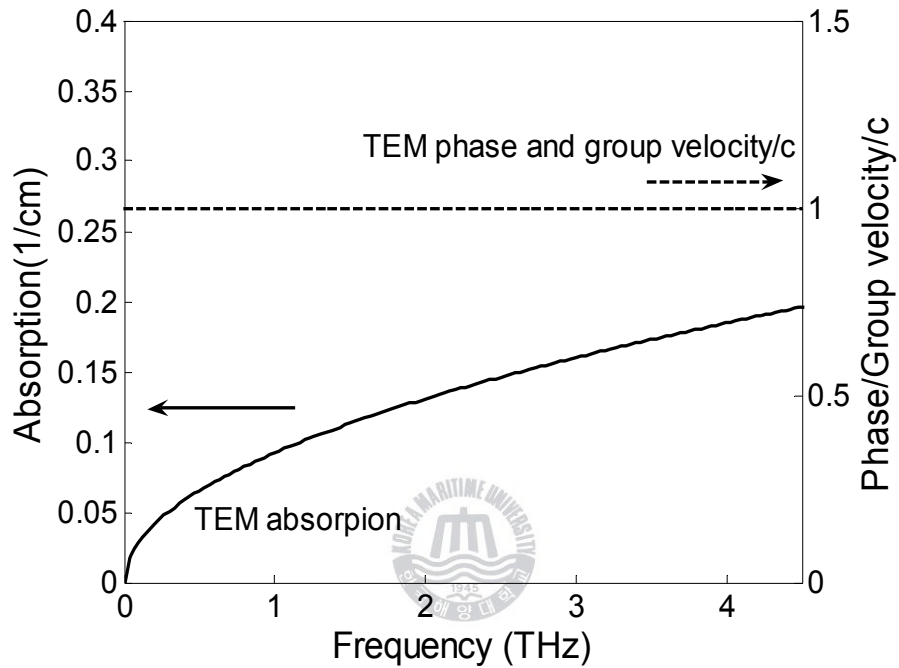


그림 3.1 $100\mu\text{m}$ gap PPWG의 흡수율 및 위상속도/군속도 그래프

3. 1. 2 평행판 도파로 전파손실

THz-TDS를 이용한 PPWG의 TEM 전파는 이미 그 특성이 연구되어져 있다 [8,18]. 본 절에서는 실험을 통하여 PPWG의 전파특성을 확인하고 PPWG의 전파손실에 대해서 알아보도록 하겠다. TEM 모드를 형성시키기 위해 입사되는 THz 파의 전계방향이 PPWG의 금속 평행판에 수직이 되도록 위치시키고 두 평행판의 간격이 $100\mu\text{m}$ 사이에 실리콘 렌즈를 이용하여 THz 파를 입사 전파 하였다.

그림 3.2(a)는 측정된 THz 파의 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 점선은 TEM 모드의 THz 파의 파형이고 실선은 THz 파가 PPWG의 실리콘 렌즈 집속에 의해 $100\mu\text{m}$ gap에서 30mm를 전파한 TEM 모드의 파형이다. 공기 중으로 전파된 THz 파의 반칙폭(Full Width Half Maximum) 0.30psec 이고 PPWG를 전파한 반칙폭이 0.40psec 이다. 실리콘 렌즈와 도파로로 인해 분산이 0.1psec 일어나지만 공기 중으로 전파한 THz 파와 유사한 펄스 모양을 가지는 것을 알 수 있다. 다만 메인펄스의 최대값과 최소값의 차이가 확실히 나는 것을 확인 할 수 있는데, 이것은 PPWG의 양쪽에 부착된 실리콘렌즈에 의한 반사손실이 첫 번째 원인이고, 두 번째는 실리콘렌즈와 도파로의 결합시 발생하는 구조적인 문제로 결합손실이 발생하기 때문이다. 그러므로 PPWG를 전파한 THz 파는 실리콘 렌즈와 구조적 손실에 따른 크기 변화는 있지만 분산이 아주 작다는 것이다. 이것이 PPWG가 다른 도파로에 비해 매력적인 부분이다.

그림 3.2(b)는 시간영역의 그래프를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transform, FFT) 하여 나타낸 주파수영역의 그래프이다. 점선은 공기 중으로 전파한 THz 파이며 그 중심주파수는 1 THz 이며 에너지가 4 THz까지 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 유사하게 실선은 PPWG를 전파한 것이며 중심주파수가 0.9THz이고 전체적으로 보았을 때 저주파 쪽으로 약간 이동 된 것을 확인할 수 있으나 그 에너지가 거의 4 THz 까지 존재하는 것으로 보아 공기 중으로 전파하는 TEM 모드와 유사한 특징을 보여준다.

주파수영역에서 일점쇄선은 실리콘 렌즈 없이 $100\mu\text{m}$ gap에서 30mm의 도파로를 전파했을 때 나타낸 그래프이다. 이는 다음과 같은 계산식에 의해서 구해진 이론적인 결과 값이다. $100\mu\text{m}$ gap에서 30mm의 도파로를 전파한 것을 E_{PPWG} 라고 하면,

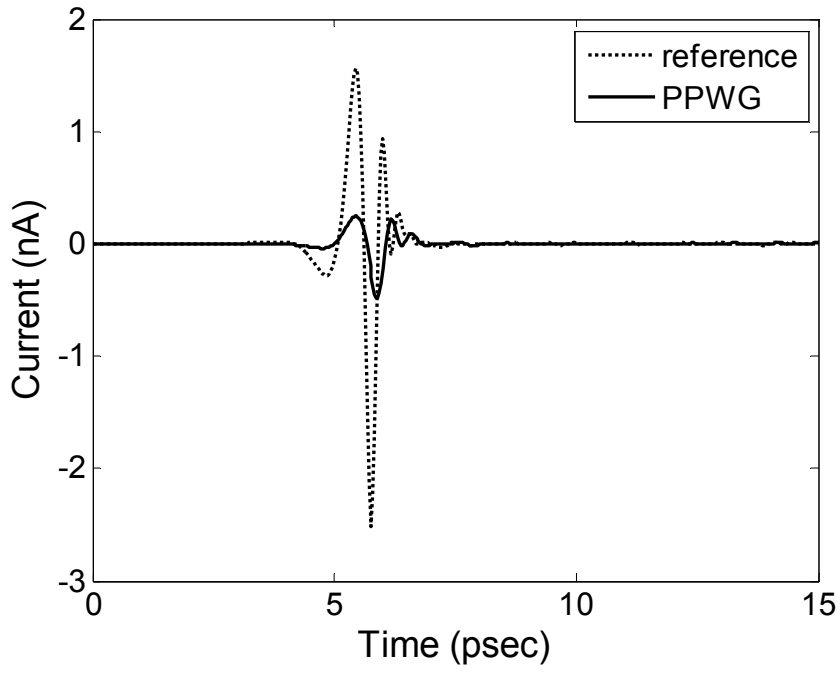
$$E_{PPWG} = E_{reference} \times e^{-\left(\frac{d\alpha}{2}\right)} \text{-----} (18)$$

와 같은 식으로 표현 할 수 있다. 이때, $E_{reference}$ 는 공기 중으로 전파된 THz 파이며, d : 도파로의 길이, α : TEM 모드의 흡수율-식(17) 이다.

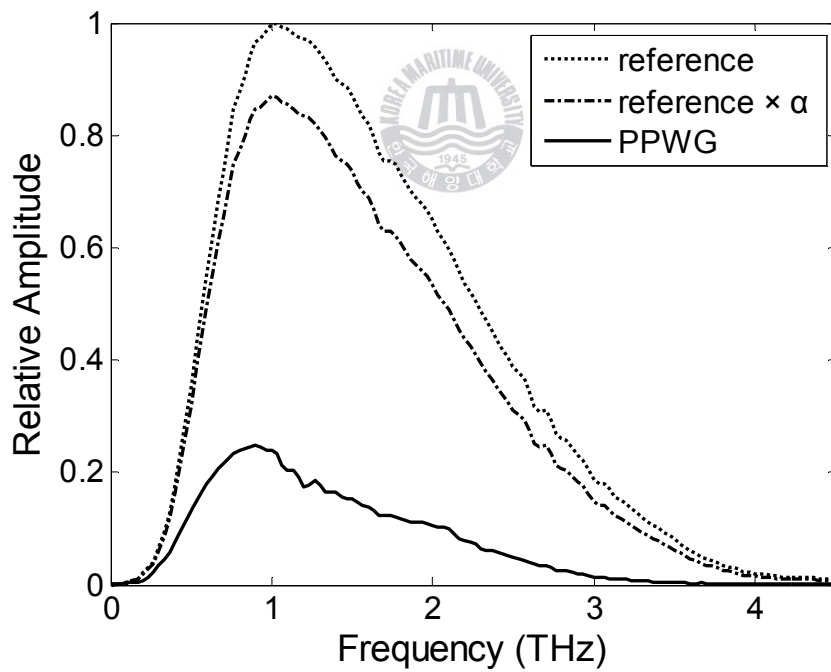
주파수 영역에서 볼 수 있듯이 이렇게 구한 도파로의 손실은 1 THz에서 13% 를 가지며 나머지 63%에 해당하는 손실이 실리콘 렌즈에서 오는 반사손실과 구조결합손실로 볼 수 있다.

이러한 실리콘 렌즈의 반사손실과 구조결합손실을 줄이기 위해 구조가 단순 하면서 실리콘 렌즈의 반사손실을 줄일 수 있는 TPPWG를 제안하였다.





(a)



(b)

그림 3.2 (a) PPWG의 THz 파 시간영역 그래프
(b) PPWG의 THz 파 주파수영역 그래프

3. 2 경사각에 따른 one-sided TPPWG 전파특성

3. 1에서 PPWG 이 TEM 모드 전파특성이 군속도 분산이 거의 없는 THz 파를 전파하는 것을 보였다. 그러나 PPWG 양쪽에 실리콘렌즈로 인한 반사손실과 구조결합 손실이 발생하여 훌륭한 TEM 모드 전파에도 불구하고 결합 세기가 작아 효율적인 면에서 많은 제약이 따를 것으로 생각된다. 그래서 결합효율을 보다 강화시키기 위해서 경사진 형태를 가지는 도파로를 디자인하게 되었고 이 제작된 one-sided TPPWG는 PPWG보다 향상된 것을 실험적으로 확인하였다.

One-sided TPPWG의 평행판 부분의 $100\mu\text{m}$ gap 사이에 THz 파를 집속시키기 위해서 입구 쪽의 경사각 θ 를 조절하여 THz 파가 가장 많이 결합할 수 있도록 실험으로 확인해 보았다. 경사각 θ 를 20° , 15° , 10° , 5° , 3° 로 점차 줄여 실험 장치도에 따라 실험을 진행하였으며 다음과 같은 실험값을 얻을 수 있었다.

그림 3.3(a)의 실선은 경사각에 따른 one-sided TPPWG를 전파한 시간영역 그래프이고 점선은 PPWG를 전파한 시간영역의 그래프이다. 실제 data는 0~16psec 까지 측정을 하였고 THz 펄스 크기변화를 확인하기 위해 3~6psec 까지 데이터만을 취득하여 경사각에 따른 THz 파를 동시에 나타낸 것이다. 육안으로도 각도에 따라 확실히 peak to peak 값의 차이가 구별된다. 수치적으로 값을 나타내어보면 θ 가 차례로 20° , 15° , 10° , 5° , 3° 일 때 peak to peak 값은 차례로 501pA, 589pA, 736pA, 1093pA, 1380pA 로 나타나며 경사각이 작을수록 THz 파의 세기가 커지는 것을 알 수 있다. 그림3.3(b)에서 PPWG의 peak to peak 값은 788pA 이므로 경사각이 10° 보다 작을 때 one-sided TPPWG는 PPWG보다 크기가 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한 경사각에 따른 one-sided TPPWG의 반칙폭을 보면 경사각 차례대로 0.31psec, 0.31psec, 0.32psec, 0.31psec, 0.32psec 이고 PPWG의 반칙폭은 0.40psec 이다. 이는 경사각을 가지는 구조에서 경사각에 따른 분산의 영향이 거의 없음을 나타내고 있으며 PPWG보다 분산이 적음을 나타내고 있다.

그림 3.3(c)는 시간영역의 0~16psec의 데이터를 FFT 하여 나타낸 주파수영역의 그래프이다. 경사각에 상관없이 중심주파수가 1THz 이고 에너지가 4THz 까

지 존재하는 것을 알 수 있으며 그 크기 역시 경사각이 작아질수록 커짐을 알 수 있다. 측정된 최대경사각 20° 와 최소경사각 3° 크기가 거의 3배 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며 크기가 가장 큰 3° 일 때 PPWG와 비교해보면 1 THz에서 60% 향상된 것을 확인할 수 있다. 이는 본인이 제안한 one-sided TPPWG가 결합효율이 좋다는 것을 나타내고 있다.

요약하면, one-sided TPPWG는 경사각에 상관없이 TEM 모드의 전파가 가능하였고, 경사각 θ 가 작아질수록 THz 파의 세기가 향상되는 것을 실험적으로 확인 하였고 PPWG와 비교하여 경사각이 10° 이하 일 때는 PPWG보다 결합효율이 향상됨을 알 수 있었다. 특히 경사각이 3° 일 때 PPWG와 비교하면 60% 향상되었다. 이것은 PPWG의 입력단의 실리콘 렌즈의 역할을 할 수 있는 구조를 구현한 것이며 실리콘 렌즈의 반사손실을 제거하게 되면서 그 결합효율이 크게 향상되는 결과를 확인하였다.

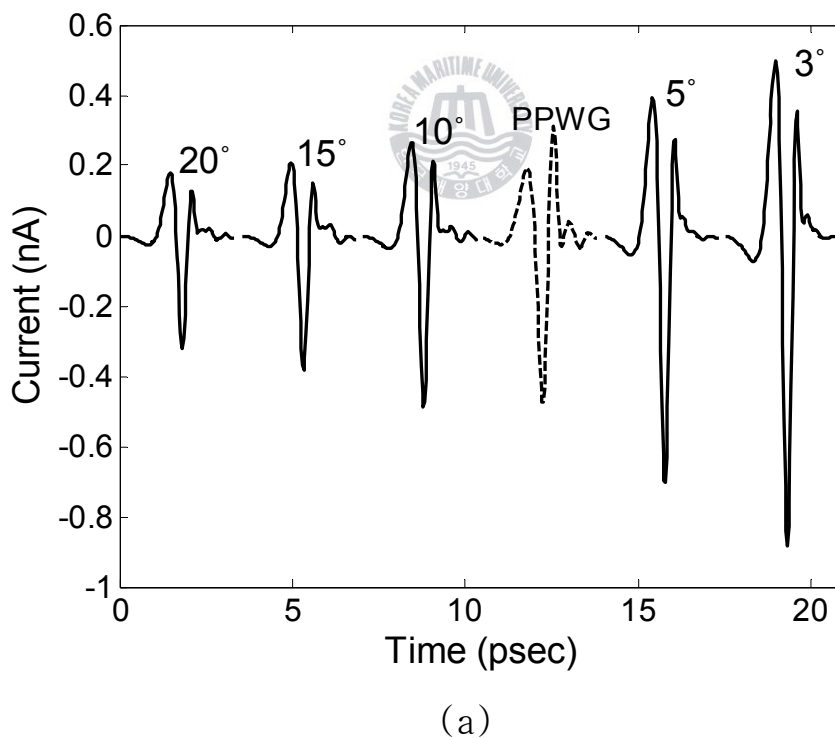
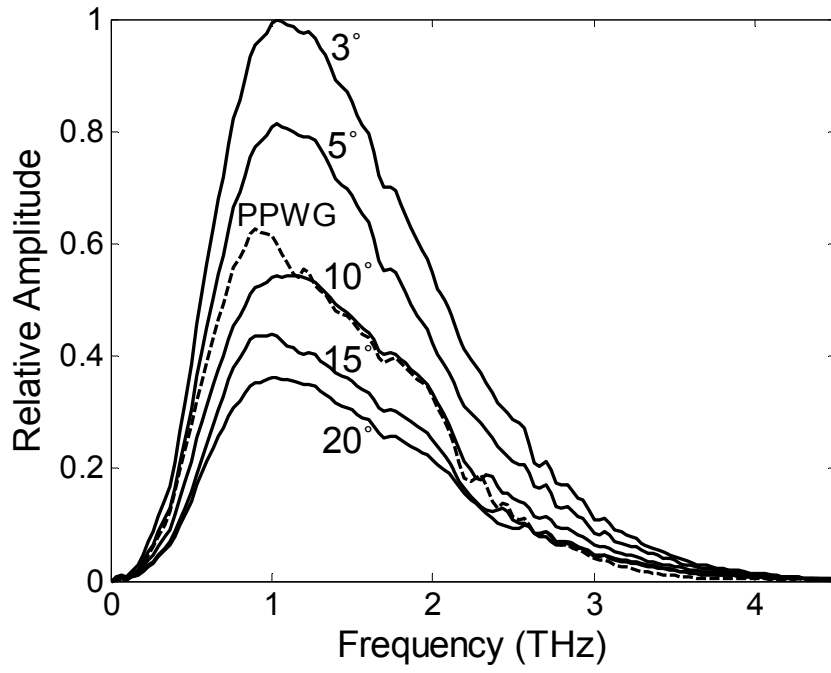
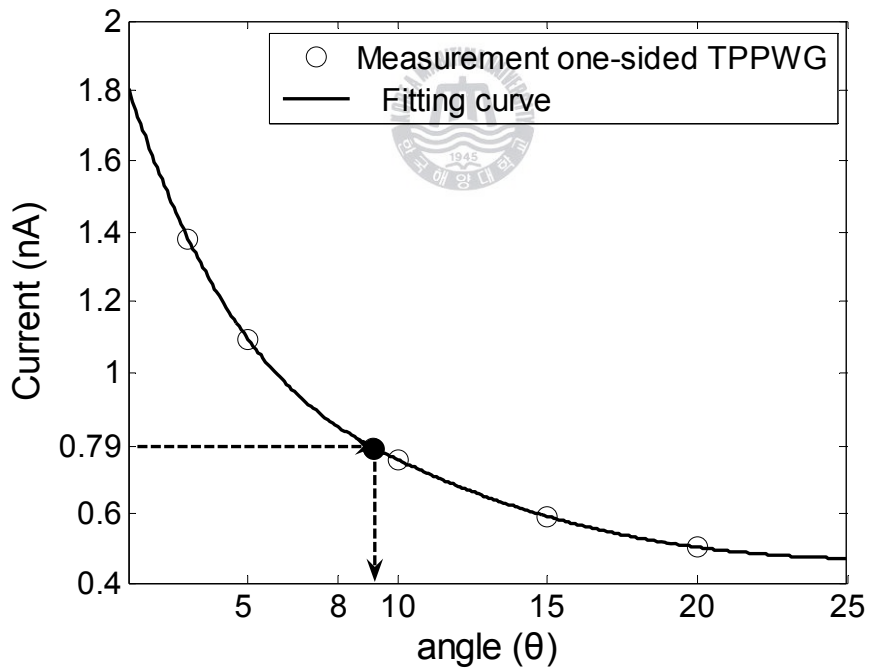


그림 3.3 (a) 경사각에 따른 one-sided TPPWG THz 파 시간영역 그래프



(b)



(c)

그림 3.3 (b) 경사각에 따른 one-sided TPPWG THz 파 주파수영역 그래프
(c) 경사각에 따른 one-sided TPPWG Peak to Peak 곡선

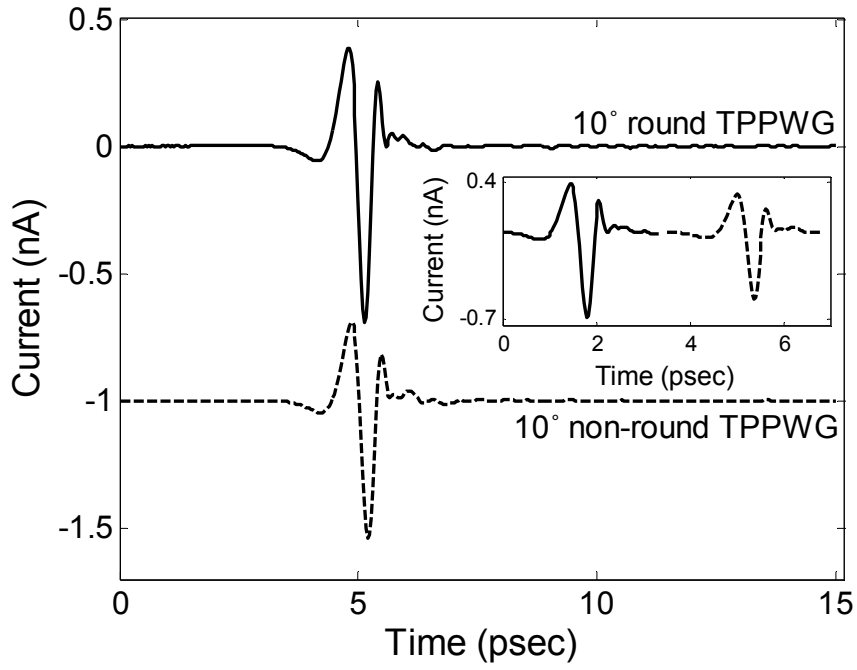
3. 3 경계면이 둥근 one-sided TPPWG 전파특성

앞서, one-sided TPPWG를 제안하여 PPWG 입력단의 실리콘 렌즈의 역할을 하면서 PPWG 보다 결합효율이 좋은 TEM 모드의 THz 파의 전파를 확인하였다. 이 one-sided TPPWG의 구조를 자세히 보게 되면 평행한 부분과 경사진 부분이 만나는 경계면이 상당히 뾰족하다는 것을 알 수 있다. 이 경계면의 구조 때문에 $100\mu\text{m}$ 라는 좁은 공간에서 입사되는 THz파의 반사파가 생기게 되며 이 반사파는 결국 도파로의 손실을 가져오게 된다. 그래서 이 뾰족한 부분을 완만하게 만든다면 THz 파가 $100\mu\text{m}$ 의 좁은 공간사이를 지날 때 반사파의 손실을 줄일 수 있을 것이라 예상하였다.

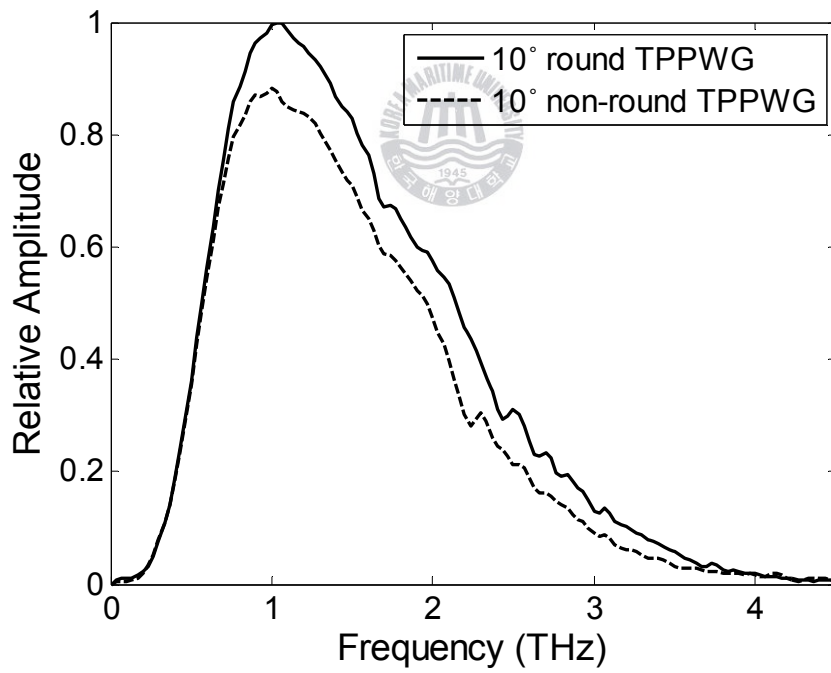
이러한 경계면의 반사파의 손실을 줄이기 위해 뾰족한 경계면 부분을 완만한 곡선으로 만들어 보았다. 경사각이 10° 인 one-sided TPPWG를 제작하여 그 경계면 부근을 직경이 80ϕ 를 가지도록 둥글게 가공하여 round TPPWG와 non-round TPPWG의 두 도파로를 전파특성을 비교하였다.

그림 3.4(a)는 round TPPWG의 THz 파 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 실선은 round TPPWG이고 점선은 non-round TPPWG 이다. 이전 실험과 동일한 조건의 환경에서 실험을 실시하였고 반칙폭도 round TPPWG는 0.32psec, non-round TPPWG는 0.32psec로 측정되었다. 이것은 분산이 없는 TEM 모드의 THz 파가 전파됨을 알 수 있었다. 또한 peak to peak는 round TPPWG가 non-round TPPWG보다 15% 향상된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.4(b)는 시간영역의 그래프를 FFT 하여 나타낸 주파수 영역의 그래프이다. 중심주파수 역시 1 THz, 에너지 역시 4THz 까지 존재하는 것을 알 수 있다. 주파수영역에서 비교해 보았을 때 round TPPWG가 대략 13% 정도 향상됨을 알 수 있었다. 즉 경계면을 둥글게 가공한 결과 기존의 one-sided TPPWG 보다 전파효율이 향상된 것을 확인 할 수 있었으며 경계면의 구조가 변화 되어도 TEM 모드의 THz 파가 전파됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.4 (a) 10° round TPPWG, non-round TPPWG THz 과 시간영역 그래프
 (b) 10° round TPPWG non-round TPPWG THz 과 주파수영역 그래프

3. 4 Two-sided TPPWG 전파특성

3. 4. 1 Two-sided TPPWG 구조

앞선 장에서 PPWG 와 one-sided TPPWG의 구조 변화를 이용하여 TEM 모드의 THz 파를 전파 시켰다. PPWG에서 반사손실을 가져오는 양쪽의 실리콘렌즈를 대신하여 경사진 구조로 변화시켰다. 이 one-sided TPPWG는 경사각에 의해 결합 효율이 향상되어 PPWG의 실리콘 렌즈의 반사손실을 제거 할 수 있는 구조가 되었다. 또한 실제로 TEM 모드 전파 역시 PPWG와 동일한 형태를 파형이 나오는 것을 확인하였다. 이 장에서는 앞서 증명된 경사진 구조를 이용하여 two-sided TPPWG의 도파로를 제안하였으며 그 전파특성 실험을 실시하였다. 앞 장에서 알 수 있듯이 PPWG의 입력단의 실리콘 렌즈는 도파로 내부로 THz 파를 집속시키기 위한 것이고, 출력단의 실리콘 렌즈는 도파로 내부로부터 전파되어온 THz 파를 공기 중으로 평행하게 방사하는 역할로 사용되었다. One-sided TPPWG에서는 PPWG의 입사되는 실리콘 렌즈의 역할을 대신하는 경사진 구조를 만들었으며 이 입력단의 구조가 출력단의 실리콘 렌즈대신 동일하게 적용이 된다면 PPWG의 반사손실이 많은 실리콘렌즈를 모두 제거할 수 있게 될 것이다. 구조 또한 단일 구조로 바뀌게 되어 구조결합손실을 줄이게 되어 도파로의 결합 효율을 크게 향상시킬 수가 있다.

평행하게 진행하는 THz 파가 one-sided TPPWG로 입사하게 되면 경사면에 의해 전반사가 일어난다. 이 전반사 각은 전반사 될 때 마다 커지게 되어 도파로 내부로 THz 파를 집속 시킨다. 이 경사면의 구조를 one-sided TPPWG의 출력단, 즉 평행판 도파로의 실리콘 렌즈가 사용된 출력단의 구조를 바꾸게 되면 평행판 내부에서 전파되어 온 THz 파가 출력단 경사면에 의해 반사가 되게 된다. 그러면 출력단의 경사면에서 전반사 될 때 마다 THz 파는 점점 작은 전반사 각을 가지게 된다. 그러면 THz 파는 입사면과 같이 평행하게 진행하게 되고 parabolic 미러를 통해 RX에 집속되게 된다. 즉 출력단과입력단의 경사면을 동일한 구조로 만들어 주면 one-sided TPPWG의 출력단의 실리콘 렌즈의 역할을 대신할 수 있게 되는 것이다. 이것을 two-sided TPPWG 라 하며 이것은 PPWG의 양쪽의 집속과 방사의 역할을 하는 실리콘 렌즈를 대신하게 되어 신호의 결합

효율을 크게 향상시킬 수 있으며 실리콘렌즈-평행판-실리콘렌즈 와 같은 결합 구조와는 달리 단일 구조를 실현 할 수 있어 구조결합손실을 크게 줄일 수 있다.



3. 4. 2 입사 방향에 따른 one-side TPPWG 전파

3. 4. 1절에서 제안된 내용을 바탕으로 새로운 구조를 가지는 two-sided TPPWG를 제작하기 전에 검증을 위한 실험을 진행하였다.

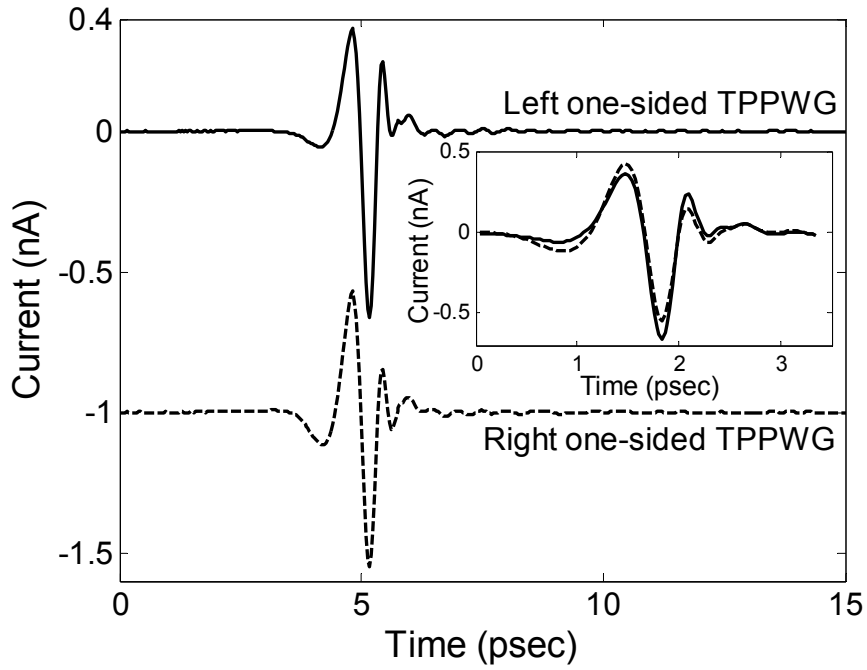
One-sided TPPWG에서 입사면이 경사각을 가지는 구조를 left one-sided TPPWG, 이것과 반대의 구조를 가지는 즉, 출력단이 경사각을 가지는 구조를 right one-sided TPPWG라 표기 하였다. 이 두 구조에서 THz 파를 전파시켜 비교하여 신호가 왜곡 없이 동일하게 나오게 된다면 위에서 언급한 출력단의 실리콘 렌즈의 역할을 하는 구조를 가지게 될 것으로 예상하였다.

그림 3.5(a)는 측정된 THz 파의 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 실선은 left one-sided TPPWG를 전파한 것이고 점선은 right one-sided TPPWG를 전파한 것이다. 삽입된 그래프는 peak to peak를 확인하기 위해서 삽입하였다.

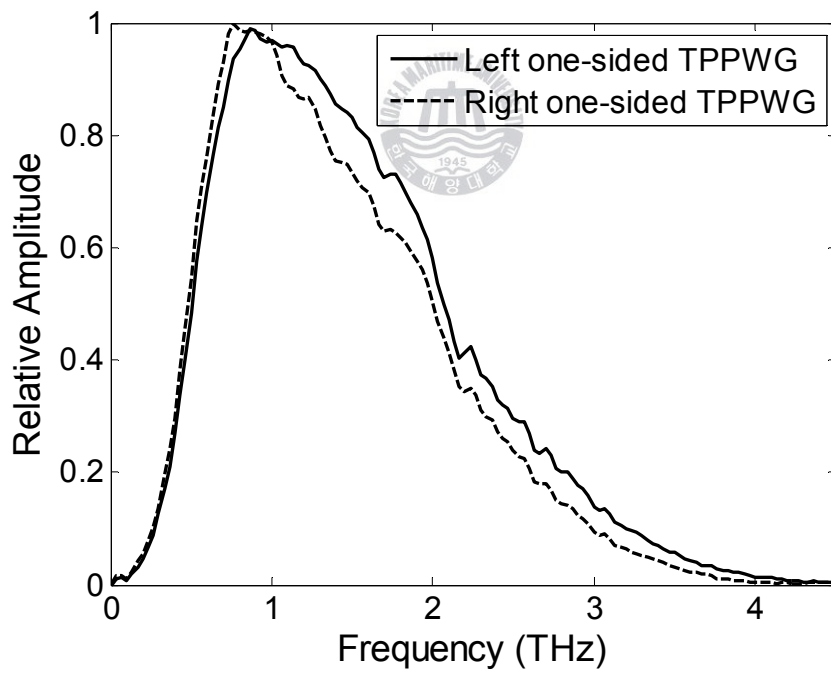
left one-sided TPPWG의 반칙폭은 0.33psec 이고 right one-sided TPPWG의 반칙폭 역시 0.33psec로 측정되었다. 이는 서로 다른 구조의 두신호가 동일한 형태로 전파되었다는 것을 말해준다.

그림 3.5(b)는 시간영역의 그래프를 FFT 나타낸 주파수 영역의 그래프이다. 전체적으로 보았을 때 right one-sided TPPWG가 저주파 쪽으로 약간 이동된 것으로 보인다. 그러나 주파수영역이 왜곡이 없고 중심주파수가 1 THz 이고 4 THz 까지 에너지가 존재 하는 것을 보아 left one-sided TPPWG 나 right one-sided TPPWG의 전파특성이 동일하다는 것을 알 수 있다

이 실험의 결과를 미루어 볼 때 앞서 제안한 PPWG 에서의 실리콘 렌즈를 대신할 구조가 바로 two-sided TPPWG 가 될 수 있다는 것을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 3.5 (a) left-, right- one-sided TPPWG THz 파 시간영역 그래프

(b) left-, right- one-sided TPPWG THz 파 주파수영역 그래프

3. 4. 3 Two-sided TPPWG 전파

3. 4. 2절에서 실험을 바탕으로 새로운 구조를 가지는 two-sided TPPWG를 제작하였다. 구조에 대해서는 2장에서 자세히 나타내었으므로 생략하도록 하겠다. 새롭게 제작한 two-sided TPPWG는 구조가 간단하면서도 결합효율이 좋은 새로운 형태의 THz 도파로로 확신하며 향상된 전파특성을 확인하기 위하여 two-sided TPPWG(경사각 $\theta=3^\circ$), one-sided TPPWG(경사각 $\theta=3^\circ$), PPWG 와의 실험을 통하여 비교, 분석을 하였다.

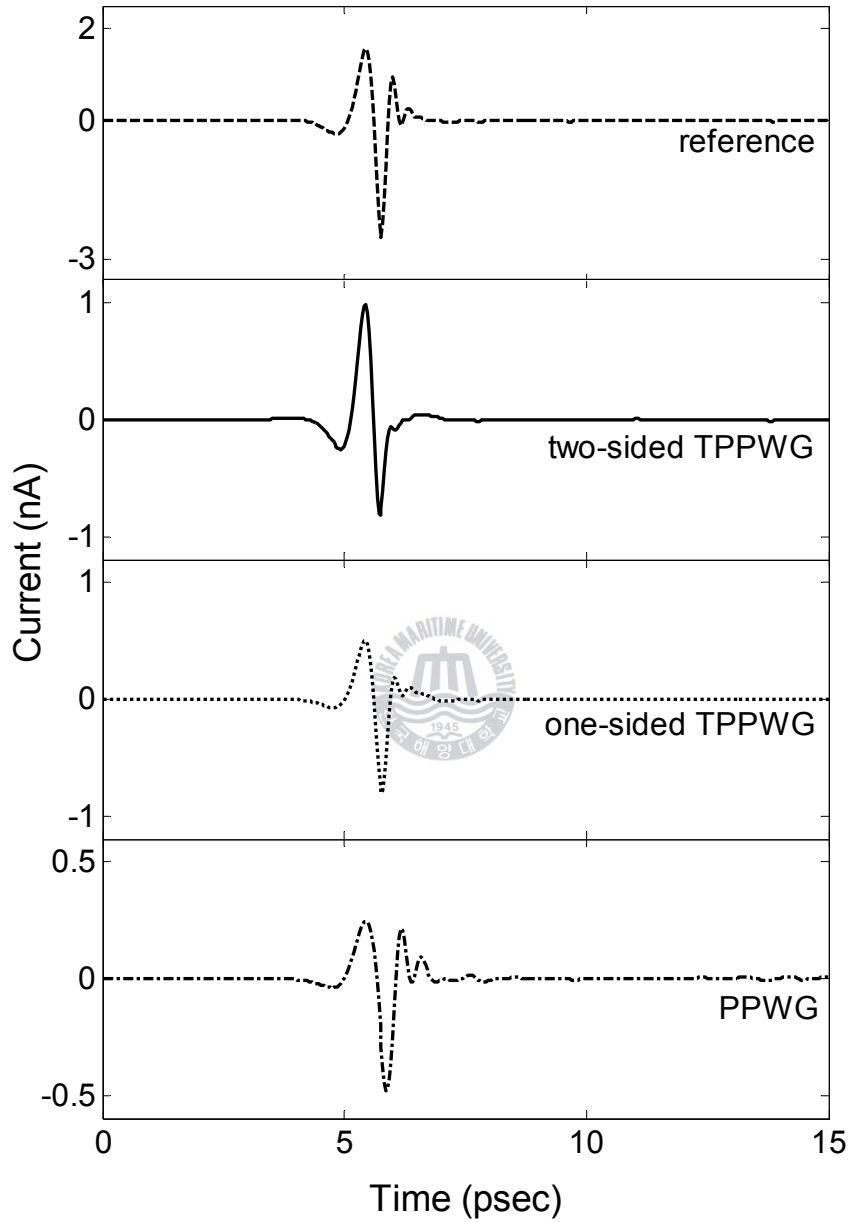
그림 3.6(a)는 전파된 THz 파의 시간영역의 그래프이다. reference, two-sided TPPWG, one-sided TPPWG 그리고 PPWG의 반칙폭은 차례대로 0.30psec, 0.31psec, 0.33psec, 0.40psec 이며 two-sided TPPWG 역시 다른 도파로와 비교했을 때 그 전파특성이 동일함을 알 수 있다. 또한 peak to peak는 3375pA, 1616pA, 1114pA, 787pA 로 측정되었으며 one-sided TPPWG와 PPWG와 비교 했을 때 결합세기가 확실히 커졌음을 알 수 있다. PPWG와 비교해보았을 때 two-sided TPPWG 와 one-sided TPPWG 는 각각 138%, 38% 향상된 것을 알 수 있다.

그림 3.6(b)는 측정된 데이터를 FFT 하여 주파수 영역의 그래프로 나타낸 것이다. 측정된 도파로 역시 1 THz의 중심주파수를 가지고 그 에너지가 4THz 까지 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 왜곡이 없는 TEM 모드의 THz 파가 전파되었음을 확인 할 수 있다.

평행판 간격이 100um gap에서 30mm의 길이를 전파한 계산된 흡수손실을 점으로 나타내었으며 이는 약 13%에 해당한다. 그림 3.6(c)는 이 계산된 흡수손실의 그래프를 two-sided TPPWG, one-sided TPPWG, PPWG 와의 비를 나타낸 것이다. 각각 결합효율이 56%, 42%, 27%로 나타났으며 two-sided TPPWG가 손실을 가장 적음을 알 수 있다. 또한 two-sided TPPWG는 PPWG와 비교할 때 100% 결합효율이 향상되었다.

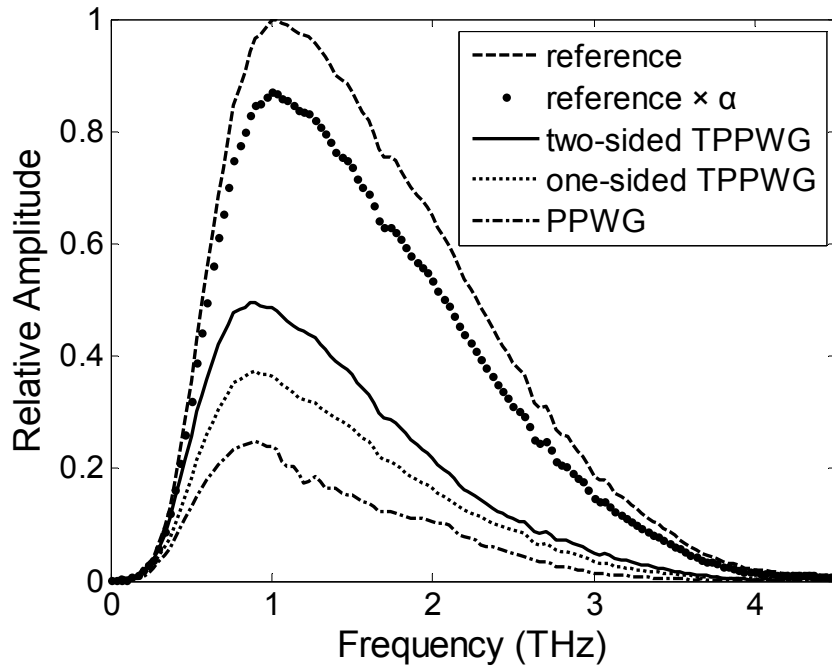
그러므로 two-sided TPPWG는 PPWG의 단점으로 지적되던 실리콘 렌즈의 반사손실, 실리콘 렌즈와 평행판과의 결합 과정에서 오는 구조결합손실을 획기적으로 감소시켰고, 실리콘렌즈-도파로-실리콘렌즈와 같은 복잡한 구조를 단순한

구조로 제작하여 단일구조의 도파로로 사용할 수 있게 되었다. 이는 THz 수동 소자로서 높은 전송효율, 간단한 구조와 같은 필요한 조건을 모두 갖추게 되어 THz 응용 분야에서 다양하게 사용되어 질것으로 생각된다.

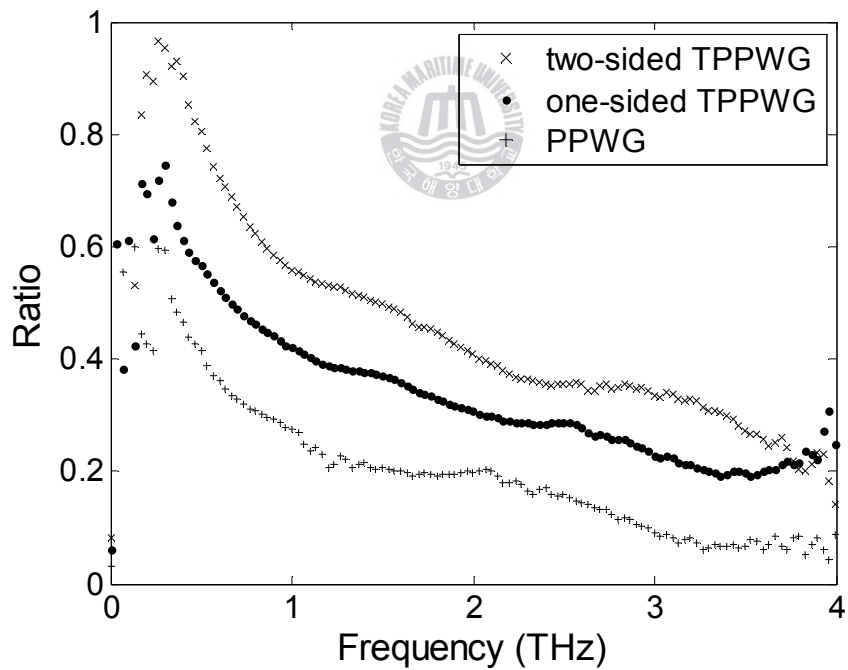


(a)

그림 3.6(a) two/one-sided TPPWG, PPWG THz 파의 시간영역 그래프



(b)



(c)

그림 3.6 (b) two/one-sided TPPWG, PPWG THz 파의 주파수영역 그래프
(c) reference $\times \alpha$ 의 ratio

제 4 장 THz 표면 플라즈몬

4. 1 표면 플라즈몬(Surface Plasmon)

표면 플라즈몬(Surface Plasmon: SP)은 유전상수의 실수항이 서로 반대의 부호를 가지는 경계면을 따라 진행하는 전하밀도의 진동파이다[20]. 일반적으로 금속(-)과 유전체(+)의 경계에서 존재하며, 전하밀도 진동은 고속으로 가속된 전자, 광파에 의하여 여기 될 수 있다[20,21]. 이러한 SP와 결합하여 진행되는 전자기파를 표면 플라즈몬 폴라리톤(Surface Plasmon Polaritons: SPP)이라고 한다. SPP는 TM-편광된 전자기파이며, 필드는 금속표면에서 가장 큰 값을 가지며 금속에서 멀어짐에 따라 지수적으로 감소한다. 경계면에 수직하는 성분인 TM-편광된 전자기파가 입사되면 전기장의 수직성분의 불연속성 때문에 표면전하가 유도되고 이러한 표면전하들의 진동이 SPP로 나타난다. 이처럼 표면에 속박되는 효율은 매우 높아 센서나 스위치 등에 많이 응용되고 있으며 금속표면의 민감한 반응을 이용한 광소자도 연구 되고 있다[22]. 반면, 금속에서 멀어짐에 따라 지수함수적으로 감소하기 때문에 전파손실이 크다는 단점이 있다. 이는 집적광학소자로의 응용으로 나아가기 위한 아주 큰 걸림돌이다. 이러한 제약을 해결하기 위해 최근 금속의 구조를 박막 형태로 만들어서 금속의 위아래 경계에서 진행되는 SPP를 상호 결합시켜 장거리 전송을 가능하게 하거나 [23] 금속 주변에 유전체 막을 형성시켜 광의 전송을 늘리거나 필드를 속박시킬 수 있다. 또한 금속표면에 주기적인 구멍이나 패턴을 형성하여 필드의 결합력을 향상시켜 쉽게 방사가 일어나지 않고 장거리전송에도 금속표면에 속박시킬 수 있는 좋은 결과들이 나오고 있다.

앞서 언급된 것처럼 SPP의 특이성을 이용해 물리, 생명공학, 화학 등 다양한 분야에서 큰 관심을 일으키고 있으며 그 응용 연구가 진행되고 있다.

본 장에서는 금속 sheet를 이용하여 THz SPP를 결합시켰으며, 높은 결합효율을 얻기 위해 PPWG와 TPPWG를 이용하였다. 또한 THz SPP를 결합효율을 향상시키기 위해 금속 sheet 표면에 주기적인 groove를 형성해 금속표면에서의 필드 결합을 향상시켰으며 이를 실험적으로 증명하였다.

4. 2 실험장치 및 구조

테라헤르츠 표면 플라즈몬(THz Surface Plasmon: TSP)을 금속에 결합 시키는 방법으로 금속표면에 주기적인 구조를 형성하여 결합, 고굴절 프리즘 렌즈를 이용한 결합, 금속 blade를 이용한 결합 그리고 PPWG를 이용하여 결합시키는 방법이 있다. 이 중에서 PPWG를 이용하여 TSP를 결합하는 방법이 가장 결합효율이 좋다[24]. 그림4.1(a)는 TSP 결합을 하기 위한 실험 장치도이다. 사용된 시스템은 앞서 사용된 THz-TDS 이며 두 parabolic mirror 사이에 금속 sheet 장치를 위치시켜 TSP를 결합시켜다(그림4.1(b), (c)참고). 이때 공기 중으로 전파하는 THz 파를 제거하기 위해서 금속 blade를 사용하여 순수한 TSP만 검출하였다.

그림4.1(b)는 금속 sheet 장치이다. 금속 sheet의 재질은 표면이 아주 매끈한 알루미늄을 사용하였고 그 두께는 50um이다. 가로와 세로의 길이는 각각 70mm, 180mm이다. 또한 TSP를 결합시키기 위한 도파로의 평행면은 30mm×80mm이고 두 도파로의 간격은 100um로 하여 THz 파의 TEM 모드가 결합되도록 하였다. 도파로와 고정하기 위해 알루미늄 표면에 구멍을 뚫었으며 결합력을 향상시키기 위해 윗면은 one-sided TPPWG를 사용하였다. 점선박스에 해당하는 부분이 TSP가 진행하는 경로이며 그 길이는 150mm 이다. 이 경로에 다양한 groove를 형성 시켜 TSP의 결합정도를 측정하였다.

그림4.1(c)는 도파로와 결합된 TSP 장치이다. TSP만을 검출하기 위해 그림과 같이 알루미늄 sheet를 굴곡이 생기도록 하였으며 이 굴곡의 깊이는 3mm로 모든 sample을 동일하게 하였다. 그 이유는 TSP는 금속표면에서 속박되는 에너지가 크지만 쉽게 방사되는 성질이 있어 굴곡의 깊이에 따라 결합되어 측정된 TSP의 에너지가 다르기 때문이다. 그래서 모든 sample을 굴곡 깊이를 동일하게 하여 정확한 결과 값을 비교 하였다.

본 실험 장치를 이용하여 TSP의 진행방향에 대해 3종류 vertical groove, horizontal groove, check groove를 금속 sheet 표면에 제작하여 그 전파특성을 확인하였다. 그림4.2는 3가지의 샘플을 나타낸 것이다. 도파로 부분을 제외하고 TSP가 진행하는 경로에 groove를 가공하였다. groove 간격이 1mm와 0.5mm로 각각을 제작하였으며 알루미늄 두께가 50um인 표면에 가공하기 위해 날카로

운 도구를 사용하였으며 그 깊이는 50um 미만으로 가공하였다. 또한 groove가 공함에 따라 생기는 모서리 부분은 TSP를 결합력을 높이기 위해 그대로 두었다. 이런 과정을 통해 제작된 샘플들은 표면이 깨끗한 알루미늄 sheet 와의 전파 실험을 통해서 TSP의 결합 정도를 알아보고 그 특성을 비교 분석하였다.

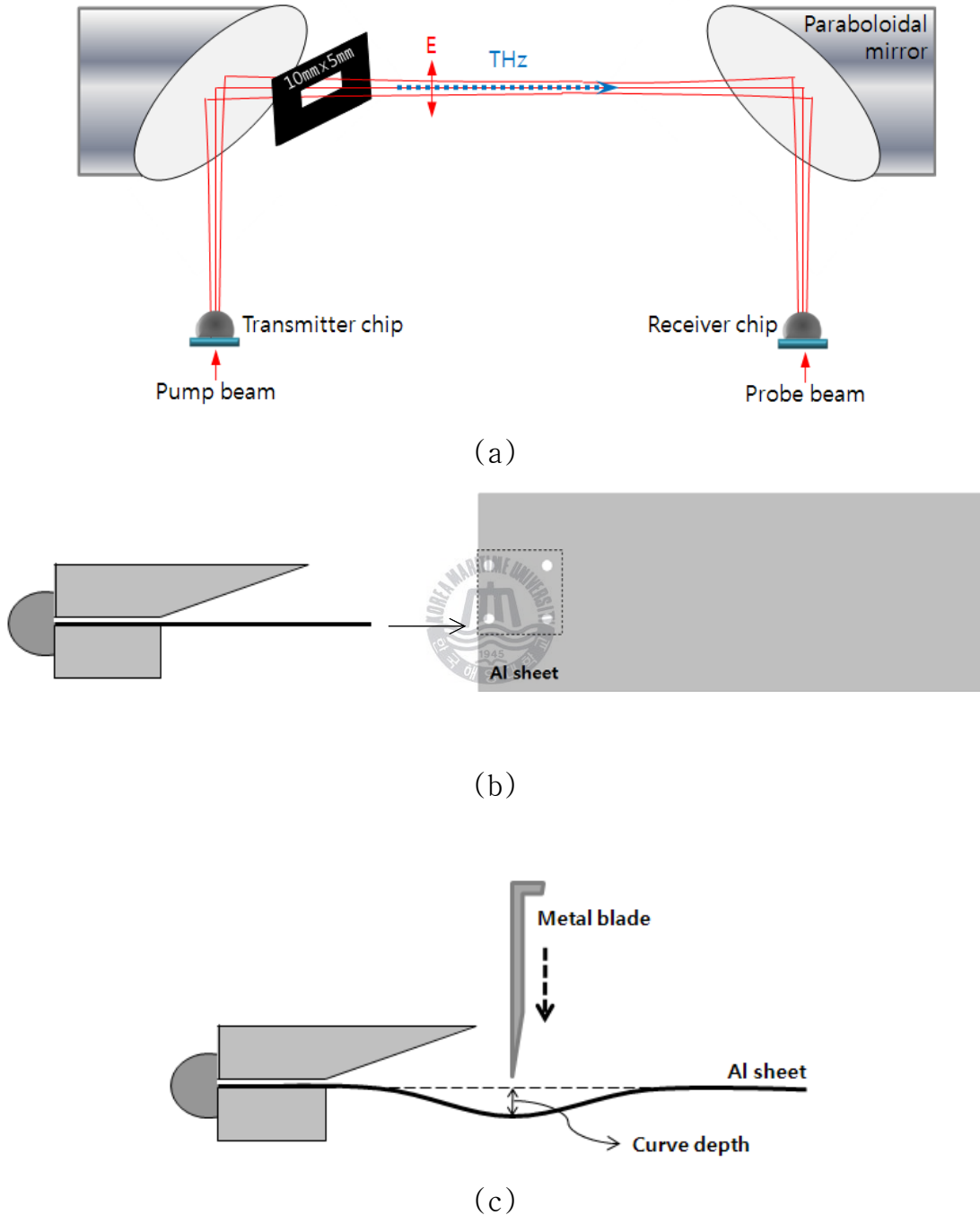
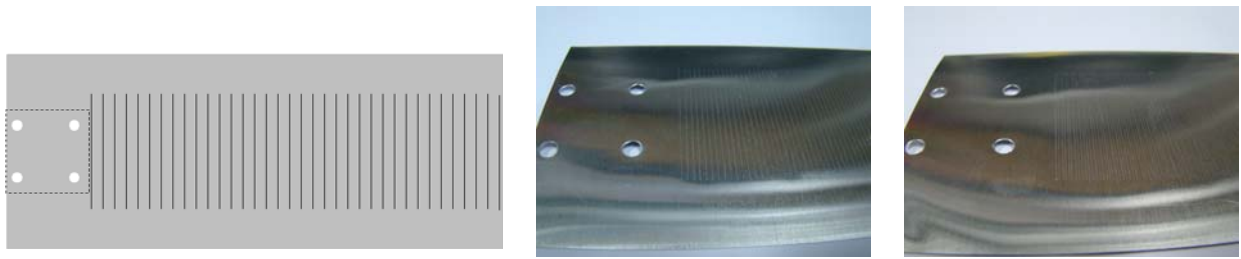
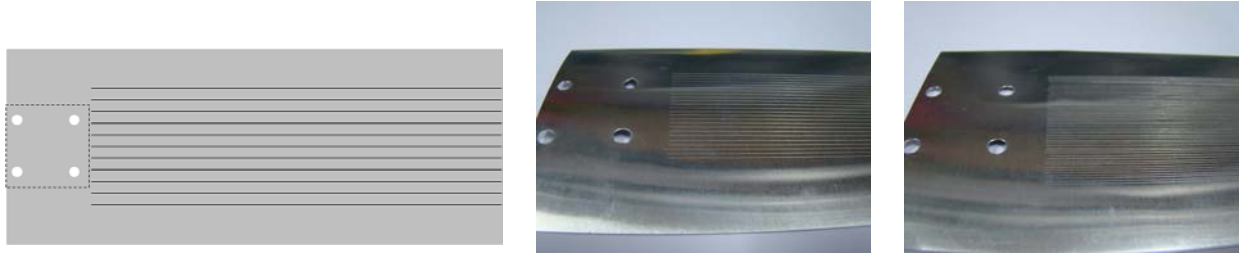


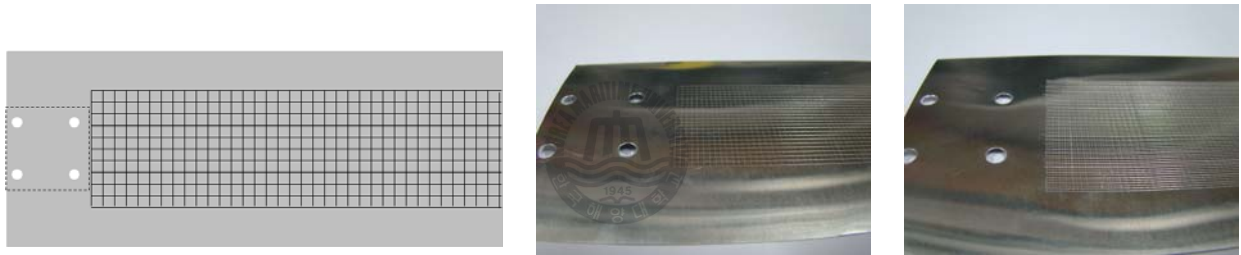
그림 4.1 (a) 실험장치도 (b) 금속 sheet
(c) 도파로를 이용한 TSP 결합 장치



(a)



(b)



(c)

그림 4.2 (a) Vertical groove 알루미늄 sheet
 (b) Horizontal groove 알루미늄 sheet
 (c) Check groove 알루미늄 sheet

4. 3 PPWG를 이용한 THz SP의 결합

최근에 PPWG를 이용하여 금속 sheet의 TSP 검출이 이미 연구되어 있다[24]. 실험에서 reference로 표면이 깨끗한 알루미늄 sheet를 사용하였다. 실제 금속 표면에 발생하는 TSP를 검출하기 위해 금속 blade를 변화 시켜 가면 측정해 보았다. 공기 중으로 전파하는 THz 파와 금속 표면을 따라 진행하는 TSP의 확실한 분리를 위해 굴곡의 깊이를 5mm로 주었다. 굴곡의 깊이가 커질수록 굴곡 면에서 TSP의 결합이 약해지지만 이 실험에서는 TSP를 정확히 검출하기 위해서 손실을 고려하지 않은 상황에서 실험을 진행하였다. 먼저 굴곡의 중앙에 금속 blade를 거의 접촉시켜 측정하였고 500um 간격으로 접촉면에서 멀어지도록 하였다. 또한 공기 중의 수분을 제거하기 위해 측정기간 동안 dry air를 넣어주어 수분을 3% 이하로 유지시켰다.

그림 4.3은 측정된 시간영역의 그래프를 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 굴곡중앙에 거의 접촉시켰을 때는 아주 작은 신호가 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 금속 blade가 완전접촉이 안되어서 나온 신호이며 금속에 결합된 TSP으로 볼 수 있다. 또한 blade가 굴곡면과 멀어질수록 신호의 크기가 증가하며 2mm의 간격부터는 좌측에서 또 다른 신호가 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 작은 신호가 점점 커질 때 뒤의 원래 신호의 크기는 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러므로 그래프의 좌측은 공기 중으로 전파한 THz 파임을 알 수 있고 우측은 금속 표면을 따라 진행하는 TSP 임을 알 수 있다.

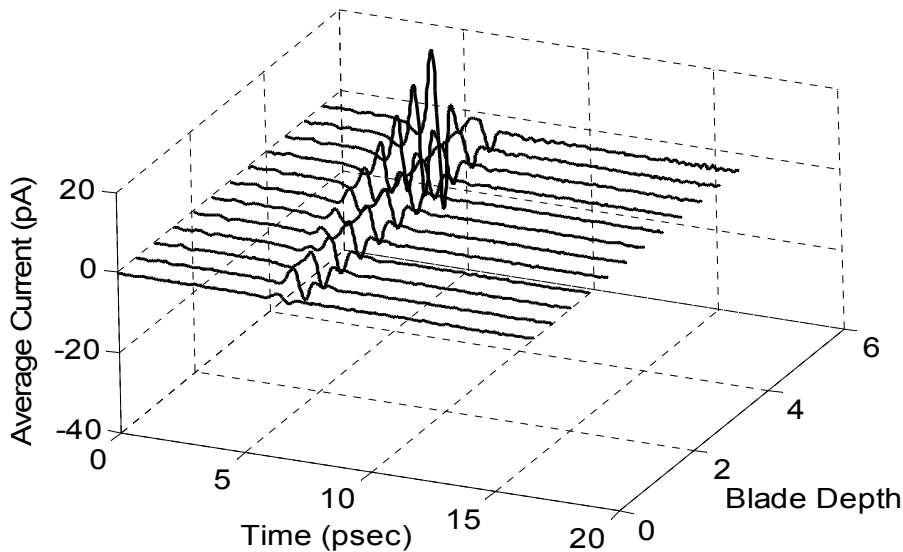


그림 4.3 검출된 TSP 시간영역 그래프

4. 4 금속 표면 구조에 따른 THz SP의 결합 특징

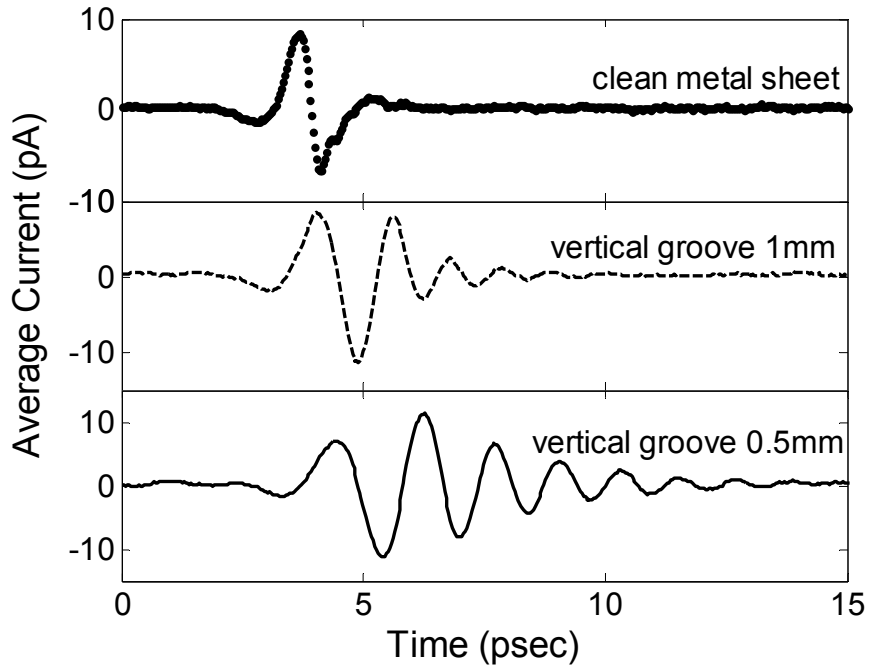
앞선 실험에서 금속 sheet 표면의 TSP를 검출하였다. 본장에서는 clean metal sheet를 reference로 하여 vertical, horizontal, check groove를 동일한 실험조건을 주기위해 굴곡 깊이를 3mm로 똑같이 유지해 TSP를 결합시켰다. 이 검출된 TSP를 시간영역과 주파수 영역으로 나누어서 그 전파특성 및 필드의 결합 정도를 분석하였다.

4. 4. 1 Vertical Groove

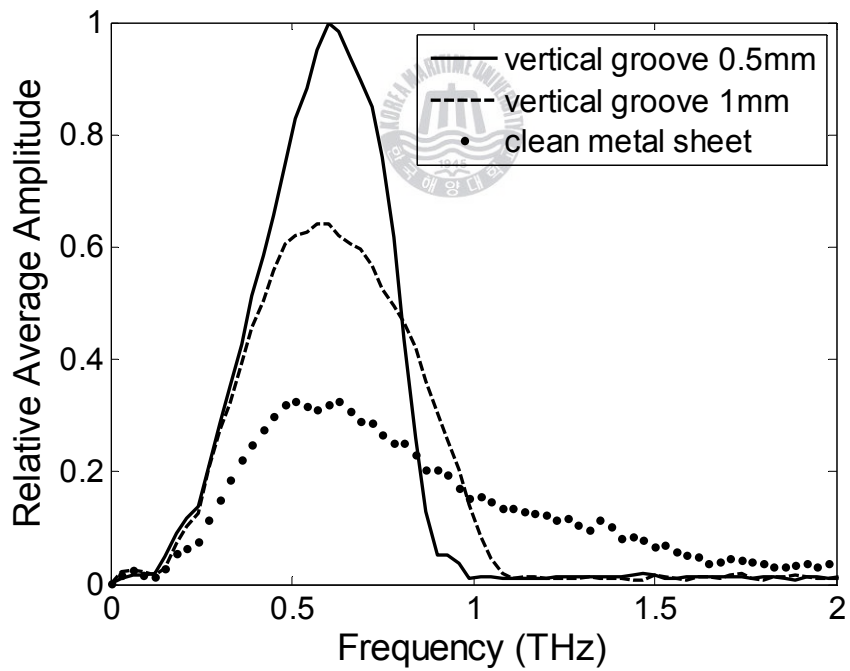
TSP가 진행하는 방향과 수직인 방향으로 groove를 제작 하였고 1mm와 0.5mm의 간격을 가지는 알루미늄 sheet를 제작(그림4.2참고)하였다.

그림 4.4(a)는 측정된 TSP 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 표면의 상태에 따라 변화를 알아보기 위해 데이터 측정시 시작점의 위치를 동일하게 하였으며 측정된 TSP의 신뢰성을 가지기 위해 같은 샘플을 총 5번씩 측정하여 그 평균값을 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 Reference와 1mm, 0.5mm 간의 시간차이를 볼 수 있다. 이것은 알루미늄 표면의 구조에 따른 TSP의 시간지연으로 발생하는 것이다. 전파되는 알루미늄의 총길이가 같을 때 groove의 간격에 따라 TSP의 시간지연이 발생 하는 것을 알 수 있다. 그리고 groove구조의 측정된 TSP의 펄스에서 메인 펄스 뒤에 오실레이션이 발생 하는데 0.5mm groove에서 더 많은 오실레이션이 생기는 것을 볼 수 있다. 이 오실레이션은 groove의 간격과 관련이 있으며, 구조에 따른 TSP의 결합정도를 나타낼 것으로 예상된다.

그림 4.4(b)는 시간영역을 FFT하여 주파수 영역으로 나타낸 그래프이다. 측정된 샘플 모두 중심주파수가 0.6 THz 이지만 에너지 밴드는 상당히 차이가 나는 것을 알 수 있다. clean metal sheet는 2 THz 까지 에너지가 존재하는 반면 groove 표면에서는 1 THz로 에너지 밴드가 줄어들었다. 반면에 중심주파수 0.6 THz groove 표면의 에너지의 크기가 상당히 커짐을 알 수 있다. clean metal sheet 와 비교 하였을 때 1mm, 0.5mm가 각각 100%, 200% 향상이 되었다. 이는 vertical groove에서 TSP의 필드가 강하게 결합된다는 것을 의미하며 그 간격이 작을수록 강하게 필드가 결합 된다는 것을 말해 준다.



(a)



(b)

그림 4.4 (a) Vertical groove의 TSP 시간영역 그래프

(b) Vertical groove의 TSP 주파수영역 그래프

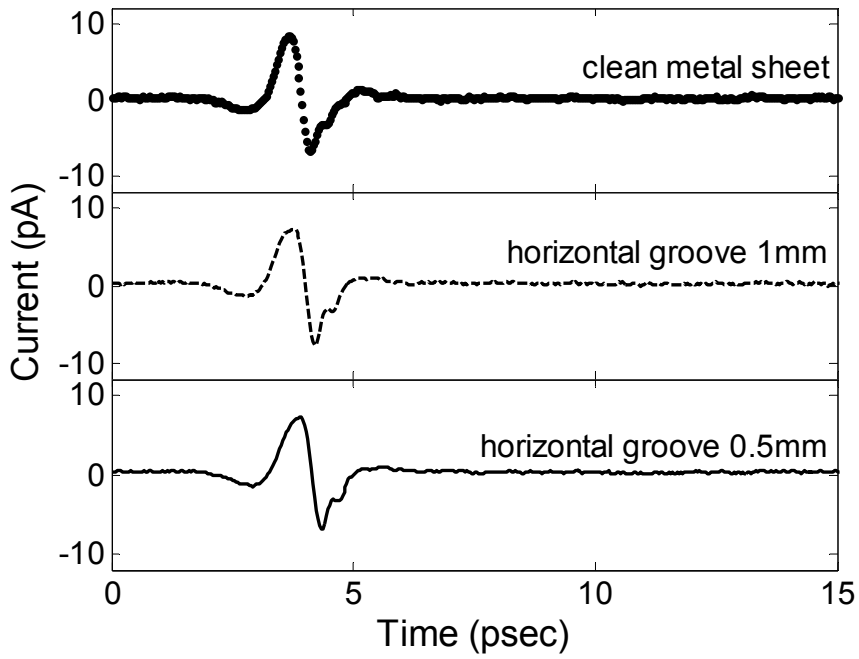
4. 4. 2 Horizontal Groove

TSP가 진행하는 방향과 수평인 방향으로 groove를 제작 하였고 1mm와 0.5mm의 간격을 가지는 알루미늄 sheet를 제작(그림5. 2참고)하였다.

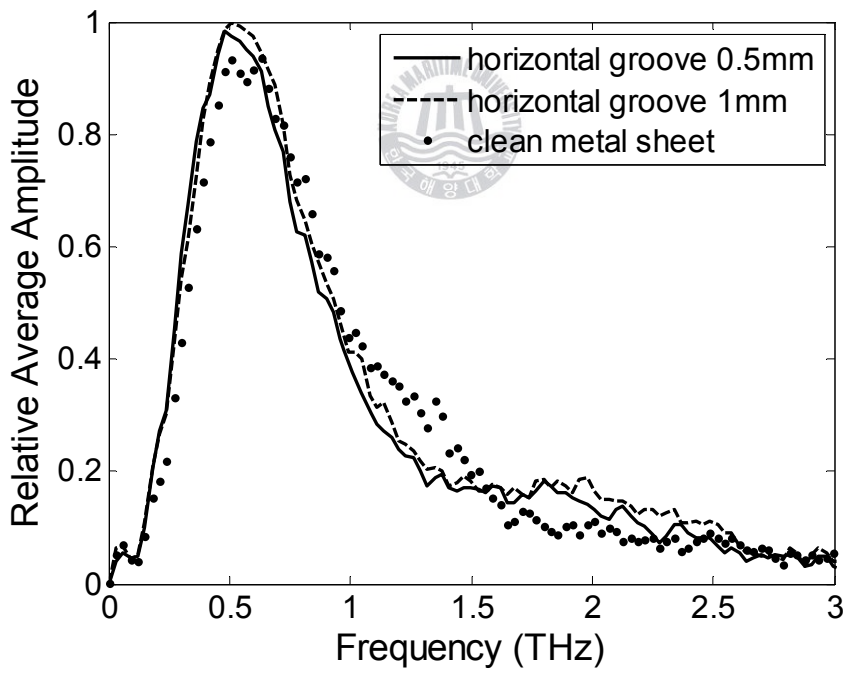
그림 4.5(a)는 측정된 TSP 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 이 샘플 역시 표면의 상태에 따라 변화를 알아보기 위해 데이터 측정시 시작점의 위치를 동일하게 하였으며 측정된 TSP의 신뢰성을 가지기 위해 같은 샘플을 총5번씩 측정하여 그 평균값을 나타내었다. vertical groove와는 달리 측정된 TSP 펄스는 시간지연이 약간 나타난 것을 알 수 있는데 이는 horizontal groove가 TSP의 전파 영향을 미치지 않은 것을 알 수 있다. 또한 신호의 크기도 비슷하고 vertical groove 발생된 오실레이션도 나타나지 않은 것으로 보아 크게 TSP에 영향을 미치지 않는 것을 말해준다.

그림 4.5(b)는 시간영역을 FFT하여 주파수 영역으로 나타낸 그래프이다. 측정된 샘플 모두 중심주파수가 0.6 THz 이고 3 THz 까지 에너지가 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 그 크기 및 분포 역시 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 이것으로 미루어 horizontal groove는 구조나 간격에서 표면을 따라 전파하는 TSP에 영향을 거의 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.





(a)



(b)

그림 4.5 (a) Horizontal groove의 TSP 시간영역 그래프
(b) Horizontal groove의 TSP 주파수영역 그래프

4. 4. 3 Check Groove

앞서 실험된 vertical, horizontal groove를 구조를 모두 가지는 check groove를 알루미늄 표면에 제작하였다. 앞선 샘플들과 마찬가지로 1mm와 0.5mm의 간격을 가지는 알루미늄 sheet를 제작(그림5. 2참고)하였다.

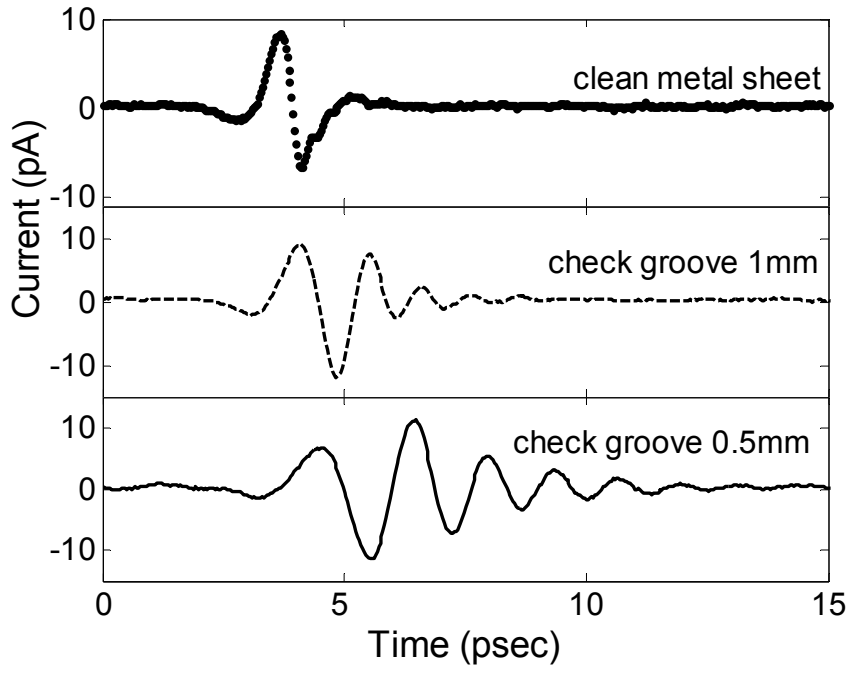
그림 4.6(a)는 측정된 TSP 시간영역 그래프를 나타낸 것이다. 측정 역시 데이터 시작점의 위치를 동일하게 하였으며 측정된 TSP의 신뢰성을 가지기 위해 같은 샘플을 총5번씩 측정하여 그 평균값을 나타내었다. 측정된 그래프는 vertical groove와 동일한 형태의 결과 값을 얻은 것을 볼 수 있다. vertical groove와 같이 시간지연을 볼 수 있으며 이 시간지연은 vertical 구조에 영향으로 발생한 것이다. 그 이유는 horizontal 구조에서는 시간지연이 미미하였기 때문이다. 또한 간격에 따라 메인펄스 뒤에 발생 되는 오실레이션 역시 vertical 구조의 영향이고 유사한 특징을 갖는다.

그림 4.6(b)는 시간영역을 FFT하여 주파수 영역으로 나타낸 그래프이다. 주파수영역 역시 vertical 구조와 거의 비슷한 특징을 나타내고 있다. 또한 0.6 THz에서 clean metal sheet와 비교 하였을 때 1mm, 0.5mm가 각각 100%, 200% 향상이 되었고 이는 vertical 구조에서와 비슷하다. 이는 두 개의 구조가 결합되어도 각각의 특징이 모두 나타나는 것을 의미 할 수 있다.

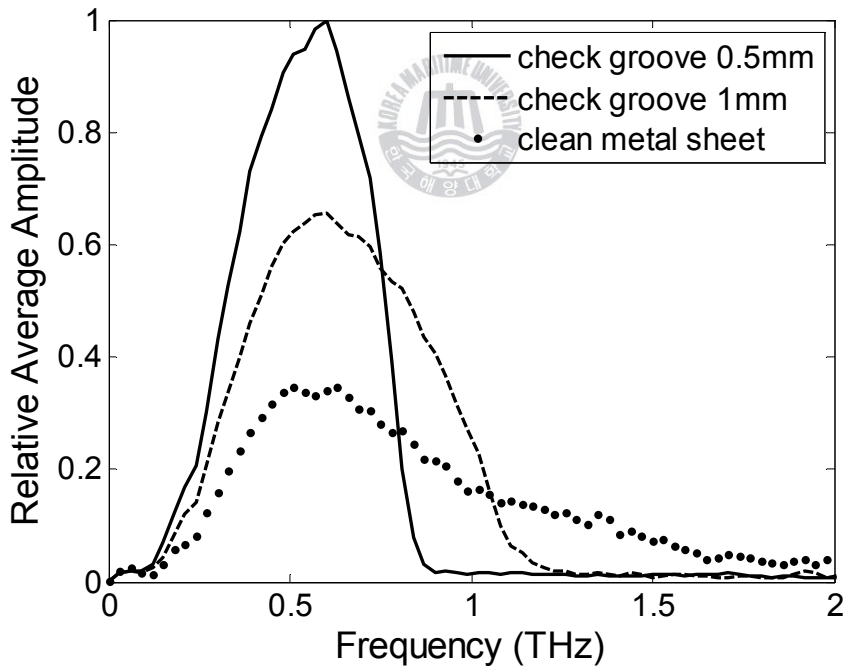
그림 4.7(a), (b)는 각각 groove의 간격이 1mm, 0.5mm의 주파수영역의 그래프를 나타낸 것이다. vertical groove와 check groove는 간격에 따라 필드의 결합력이 향상 되는 것을 알 수 있으며 groove간격이 조밀 할수록 필드의 결합효율이 향상된다. 중심주파수 0.6 THz에서 clean metal과 비교하면 간격이 1mm 일 때는 100%, 0.5mm 일 때는 200% 향상되는 것을 확인 하였다. 그러나 groove 구조에 의한 주파수 밴드의 분포가 감소하는 것을 알 수 있다.

반면에 horizontal groove는 구조의 영향을 거의 받지 않고 또한 groove의 간격 역시 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

그러므로 vertical-check groove는 금속 표면을 따라 진행하는 TSP의 결합력을 향상시켜 필드가 표면에 크게 속박을 시키므로 장거리 전송 및 집적회로와 같은 응용분야에 많은 연구가 기대 되며, 결합 효율을 높이기 위해서 TSP 결합 시킬 수 있는 구조에 대한 연구가 계속 진행 되어야 할 것이다.

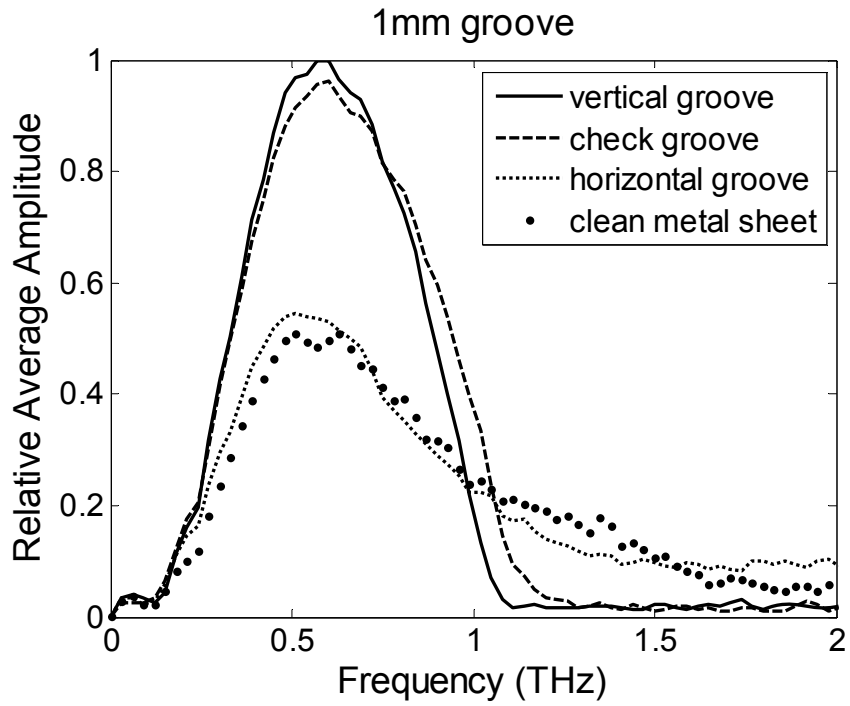


(a)

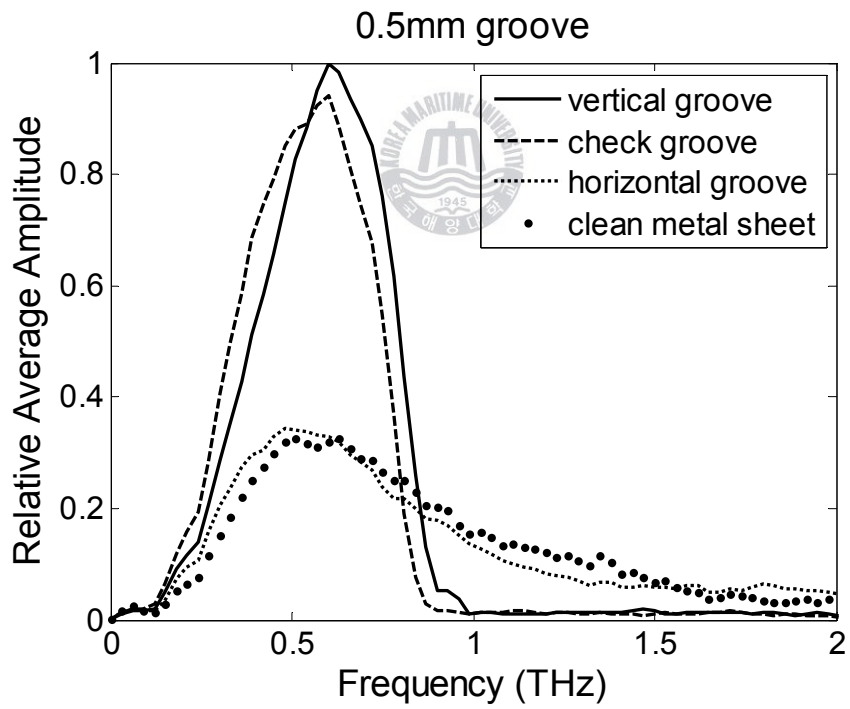


(b)

그림 4.6 (a) Check groove의 TSP 시간영역 그래프
 (b) Check groove의 TSP 주파수영역 그래프



(a)



(b)

그림 4.7 (a) Groove 간격이 1mm 일 때 주파수영역 그래프

(b) Groove 간격이 0.5mm 일 때 주파수영역 그래프

제 5 장 결 론

PPWG는 $100\mu\text{m}$ gap에서 군속도 분산이 없는 TEM 단일모드의 전파가 가능하다. 그러나 THz 파를 $100\mu\text{m}$ 이하의 gap에 집속키기 위해 실리콘 렌즈를 사용하고 또한 평행판 내부로 진행한 THz 파를 방사시키기 위해서도 실리콘 렌즈를 사용하게 된다. 이 두 개의 실리콘 렌즈 때문에 구조적으로 간단해야 할 도파로가 복잡하게 되고 평행판 사이의 gap과 실리콘 렌즈의 중앙을 정밀 제어하여 결합하는 것도 쉽지 않다. 무엇보다도 집속과 방사의 기능을 가지는 실리콘 렌즈는 THz 영역에서 높은 굴절률로 인해 반사가 크게 일어나 손실이 발생한다. 또한 실리콘렌즈와 평행판의 결합에 있어서도 손실이 발생하게 된다. 이는 원신호의 크기가 PPWG 내로 전파하게 되면 위에서 언급한 손실로 인해 결합효율이 약해지게 되어 효율적인 도파로가 될 수 없다.

PPWG 보다 결합효율이 좋은 도파로를 제안하였고 one-sided TPPWG를 제작하여 경사각 θ 20° , 15° , 10° , 5° , 3° 따라 THz 파 전파특성 실험을 실시하였다. 이 one-sided TPPWG는 PPWG의 입사면에서 집속역할을 하는 실리콘렌즈와 같은 역할을 하고 경사각에 10° 이하 일 때 PPWG 보다 결합효율이 증가하는 것을 확인하였으며 경사진 구조에서도 TEM 모드의 THz 파를 전파가 가능하였다.

또한 one-sided TPPWG의 경사면과 평행면의 경계면에서 발생하는 반사손실을 줄이기 위해서 경계면을 round 가공하여 가공전과 가공 후의 전파특성을 비교한 결과 TEM 모드의 THz파를 전파할 수 있었으며, 결합효율이 1 THz에서 14% 정도 향상됨을 확인하였다.

앞서 실시한 실험결과를 바탕으로 구조가 간단하면서 손실을 줄일 수 있는 새로운 도파관 즉, two-sided TPPWG를 제작하였다. 이 two-sided TPPWG 는 하나의 단일구조로 되어 있으며 PPWG에서의 THz 파의 집속과 방사의 역할을 담당하던 실리콘렌즈 역할을 경사면으로 처리하여 그 역할을 담당하게 하였다. 또한 전파특성 역시 군속도 분산이 없는 TEM 모드 THz 파를 전파가 가능하였으며 그 결합효율은 reference에서 평행판 간격이 $100\mu\text{m}$ gap에서 30mm 를 전파한 계산된 흡수손실이 고려된 데이터와 two-sided TPPWG, one-sided TPPWG, PPWG비

교 하였을 때 각각 결합효율이 56%, 42%, 27%로 나타났으며 two-sided TPPWG가 전파손실을 가장 적음을 알 수 있다. 또한 two-sided TPPWG는 PPWG와 비교할 때 100% 결합효율이 향상되었다. 이는 기존의 도파로에 비해 상당히 결합효율이 향상되고 진보된 도파로라고 할 수 있으며, 단순한 구조 및 향상된 결합효율로 THz 영역에서의 많은 응용연구의 발전으로 이어지게 될 것으로 기대한다.

마지막으로 PPWG의 도파로를 이용하여 알루미늄 sheet에 TSP 결합을 실험하였다. SP는 금속표면에서 강한 필드 분포를 가지지만 결합력이 약해 쉽게 방사되는 특징이 있다. 이는 장거리 전송은 물론 직접광학소자 응용에 걸림돌이다. 실험은 알루미늄 sheet에 vertical, horizontal, check groove를 만들어 TSP 결합효율을 향상시켰으며, groove 간격에 따라 TSP 결합특성을 확인하였다. vertical groove 와 check groove는 필드의 결합력이 크게 향상 되었고 groove 간격이 조밀 할수록 필드의 결합효율이 향상된다. 중심주파수 0.6 THz에서 clean metal과 비교하여 간격이 1mm 일 때는 100%, 0.5mm 일 때는 200% 향상되었다. 그러나 groove 구조에 의한 주파수 밴드의 분포가 감소하였다. 반면에 horizontal groove와 groove 간격 TSP가 영향을 거의 받지 않아 clean metal과 비슷한 전파특성을 보였다.

결론적으로 vertical, check groove는 표면을 따라 진행하는 TSP의 결합력을 향상시켜 필드가 금속 표면에 속박시켰으며 이는 장거리 전송 및 집적회로와 같은 응용분야에 많은 연구가 기대 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. McGowan, G. Gallot, and D. Grischkowsky, "propagation of ultrawideband short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides," *Opt. Lett.* 24, 1431 (1999).
- [2] G. Gallot, S. P. Jamison, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky, "Terahertz waveguides," *J. Opt. Soc. Am. B* 17, 851 (2000).
- [3] S. P. Jamison, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky, "Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fibers," *Appl. Phys. Lett.* 76, 1987 (2000).
- [4] D. Grischkowsky, "Optoelectronic Characterization of Transmission Lines and Waveguides by Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 6, 1122 (2000).
- [5] T. -I. Jeon, J. Zhang and D. Grischkowsky, "THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire," *Applied Physics Letters*. 86, 161904 (2005).
- [6] T. Akalin, A. Teizebré and B. Bocquet, "Single-wire transmission lines at terahertz frequencies," *IEEE. Trans. Microwave Theory Tech.* 54, 2762 (2006)
- [7] T. -I. Jeon and D. Grischkowsky, "Direct optoelectronic generation and detection of subps electrical pulses on sum-mm coaxial transmission lines," *Appl. Phys. Lett.* 85, 6092 (2004).
- [8] R. Mendis and D. Grischkowsky, "Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses," *Opt. Lett.* 26, 846 (2001).
- [9] R. Mendis and D. Grischkowsky, "THz Interconnect With Low-Loss and Low-Group Velocity Dispersion," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* 11, 444 (2001).
- [10] N. Laman , S. Sree Harsha, D. Grischkowsky and Joseph S. Melinger, "High-resolution waveguide THz spectroscopy of biological molecules,"

Biophys. J. 94,1010 (2008).

[11] S. Sree. Harsha, N. Laman and D. Grischkowsky, “High Q terahertz bragg resonances within a metal parallel plate waveguide,” Appl. Phys. Lett. 94, 091118 (2009).

[12] T. Prasad, V. L. Colvin, Z. Jian and D. M. Mittleman, “Superprism effect in a metal-clad terahertz photonic crystal slab,” Opt. Lett. 32, 683 (2007).

[13] E. S. Lee, D. H. Kang, A. I. Fernandez-Dominguez, F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, D. S. Kim, and T.-I. Jeon, “Bragg reflection of terahertz waves in plasmonic crystals,” Opt. Express. 17, 9212 (2009).

[14] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter and C. Fattinger, “Far-Infrared Time-Domain Spectroscopy with Terhertz Beams of Dielectrics and Semiconductors,” JOSA-B. 7, 2006 (1990).

[15] D. Grischkowsky, “An ultrafast optoelectronic THz beam system: applications to time-domain spectroscopy,” Optics & Photonics News, 21 (1992).

[16] N. Katzenellenbogen and D. Grischkowsky, “Efficient generation of 380 fsec pulses of THz radiation by ultrafast laser pulse excitation of abiaised metal-semiconductor interface,” Appl. Phys. Lett. 58, 222 (1991).

[17] D. Grischkowsky and N. katzenellenbogen, “Femtosecond pulses of terahertz radiation:physics and applications,” OSA proceeding on picosecond Electronics and Optoelectronics. 9, 9 (1991).

[18] E. S. Lee, J. S. Jang, S. H. Kim, Y. B. Ji, and T. -I. Jeon, “Propagation of single-mode and multi-mode terahertz radiation through a parallel-plate waveguide,” J. korean. Phys. Soc. 53, 1897 (2008).

[19] N. Marcuvitz, “Waveguide Handbook,” (Peregrinus, London, 1993).

[20] H. Raether, “Surface Plasmon: on smooth and rough surfaces and on gratings,” (Springer-Verlag, London, UK, 1998).

- [21] A. Otto, "Excitation of non-radiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection," *Z. Phys.* 216, 398 (1968).
- [22] S. Park, G. Lee, S. H. Song, C. H. Oh, and P. S. Kim, "Resonant coupling of surface plasmons to radiation modes by use of dielectric garings," *Opt. Lett.* 28, 1870 (2003).
- [23] T. Sterkenburgh and H. Franke, "Observation of a long range surface mode with a polymer/silver/polymer mutilayer," *J. Appl. Phys.* 81, 1011 (1997).
- [24] T. -I. Jeon and D. Grischkowsky, "THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet," *Appl. Phys. Lett.* 88, 061113 (2006).

