

# 테라헤르츠 펄스 기술

한해욱 · 유난이\* · 전대인\*\* · 진윤식\*\*\* ·  
 박익모\*\*\*\* · 김정희 · 문기원 · 한연호 · 정은아 ·  
 강 철\* · 이영락\* · 고도경\* · 이의수\*\* ·  
 지영빈\*\*\*\*\* · 김근주\*\*\* · 한경호\*\*\*\*

포항공과대학교 전기컴퓨터공학부 ·  
 \*광주과학기술원 고등광기술연구소 ·  
 \*\*한국해양대학교 전기전자공학부 ·  
 \*\*\*한국전기연구원 융합기술연구단 ·  
 \*\*\*\*아주대학교 전자공학부

## 요 약

최근 테라헤르츠 펄스 기술을 근간으로 하는 테라헤르츠 포토닉스 분야는 새로운 연구 주제로서 전세계적으로 큰 관심을 모으고 있다. 단지 순수과학적 측면에서 뿐만 아니라 상업적 응용 가능성이 높아짐에 따라 많은 선진국에서는 테라헤르츠 포토닉스의 발전을 위해 지대한 노력을 경주하고 있다. 저명한 국제 학술지와 국제 학회에서 테라헤르츠 펄스 기술에 대한 논문의 수가 폭발적으로 증가하고 있다는 것은 이러한 사실을 뒷받침하고 있다. 테라헤르츠 응용 기술은 테라헤르츠 펄스 광원과 검출기, 그리고 관련된 수동 소자의 개발이 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 테라헤르츠 광전도 안테나, 광정류, 준위상 정합 기반 차주파수 발생, 전광 샘플링, 고속 실시간 측정, 테라헤르츠 전송선, 그리고 각종 도파로 구조와 같은 기초적이면서 핵심적인 소자와 측정 기술에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

## Abstract

In recent years, the field of THz photonics based on THz pulse technology has gained tremendous, worldwide interest as a new exciting research subject. With a

possibility of many commercial applications as well as fundamental scientific achievements in the field, many advanced nations are stepping up their effort in advancing the field of THz photonics. This fact is supported by the observation of the significant increase in the number of papers on THz pulse technology presented in renowned international journals and conferences. The subject that is interesting for the THz application is the development of THz pulse sources and detectors, and other passive devices. In this paper, we present a brief review on some of the key devices and their relevant measurement techniques such as THz photoconductive antennas, optical rectification, difference frequency generation with quasi-phase matching structures, electro-optic sampling, high speed real time measurements, THz transmission lines, and other various waveguide structures.

Key Words: terahertz pulse, terahertz photonics, terahertz source and detector, terahertz waveguides

## I. 서 론

현재 테라헤르츠 기술을 선도하고 있는 테라헤르

츠 포토닉스(terahertz photonics)는 현대광학에서도 가장 최근에 연구가 시작된 다학제적 연구 분야이다. 테라헤르츠 (Terahertz, 1 THz =  $10^{12}$  Hz) 영역의 빛은 일반적으로 0.1~10 THz 정도의 주파수를 가진 전자기파를 말하며, 이는 파장으로는 30~3,000  $\mu\text{m}$ , 광자(photon) 에너지로는 0.4~40 meV에 해당하는 영역이다. 이러한 THz 대역에 대한 정의는 경우에 따라 바뀌어질 수 있음은 물론이며, 기존의 밀리미터파와 원적외선 영역과도 일부 겹치게 된다. 따라서 이러한 THz파는 광학에서 우리가 흔히 말하는 빛(photon)과 기존의 전자파 영역 사이의 중간에 위치함을 알 수 있고, 특히 물질과의 상호작용을 고려할 때 전통적인 관점에서의 빛과 전자기파의 성질을 모두 가지고 있기 때문에 순수과학적인 관점에서 매우 흥미로운 연구 대상이며, 기술적인 응용 측면에서도 그 중요성이 날이 증대되고 있다.

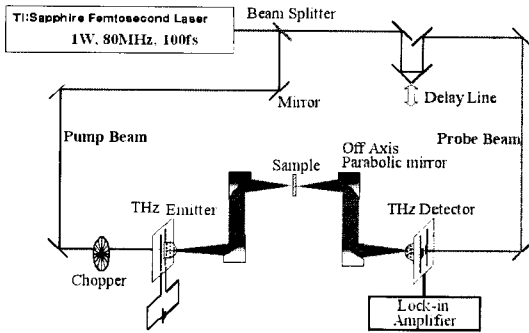
THz파는 현재 나노 기술과 정보 기술에서 가장 중요한 물질인 반도체와 유전체, 초전도체와 같은 고체, 그리고 생명, 생화학, 의료, 의약과 같은 분야에서 중요한 바이오 물질에서 일어나는 여러 가지 기본적인 현상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 THz 기술은 BT, NT, IT, ET, ST 분야에 있어서 폭 넓은 응용 가능성을 가지고 있을 뿐만 아니라 여러 기술 간의 융합 기술 발전에 큰 기여가 예상된다. 특히 THz 기술은 반도체 나노 구조, 바이오 나노 구조, Tb 급 전자/광소자의 개발과 성능 분석 및 평가에 직접적으로 연관되어 있으므로 BNIT 분야의 융합 기술 창출에 있어서 결정적인 역할을 할 것으로 전망되고 있다.

본 논문에서는 이러한 THz 펄스 기술에 대하여 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 주요 기술들에 대하여 살펴보고자 한다. THz 펄스 광원으로는 광전도 안테나(photoconductive antenna)와 비선형 광학적 방법인 광정류(optical rectification), 준위상 정합(quasi-phase matching) 차주파수 발생 기술에 대하여

살펴보며, THz 펄스 측정 기술로는 광전도 안테나와 전광 샘플링(electro-optical sampling) 기술, 그리고 회전형 지연기에 의한 초고속 실시간 측정 기술에 대해 살펴보고자 한다. 또한, THz 수동 소자로는 평면 전송선(planar transmission line), 금속 평판(metallic parallel plate) 도파로, 금속선(metal wire) 도파로, 광결정 섬유(photonic crystal fiber)에 대하여 소개하고자 한다.

## II. THz 펄스 광원 및 측정 기술

THz파 펄스 광원은 THz 포토닉스 발전에 있어 가장 먼저 확보되어야 하는 핵심 기술이다. 펄스형의 THz 광원은 펨토초의 초고속 레이저를 기반으로 하며, 이 레이저 빔을 이용하여 THz파를 발생 및 검출할 수 있다. THz 영역(주기 1 ps)의 전자기파를 발생시키기 위해서는 1 ps 이하의 펄스폭을 가지는 레이저가 필수적인데, THz파 실험에서는 주로 수십 펨토초 정도의 펄스폭을 가지는 mode-locked Ti: Sapphire 레이저가 가장 많이 사용되고 있으며, 최근에는 소형의 fiber 레이저를 사용하는 시스템도 늘어가고 있다. [그림 1]은 펄스형 THz 시스템의 개략도를 보인다. 펨토초의 레이저 빔은 빔 분배기에 의해 여기 빔(pump beam)과 검출 빔(probe beam)으로 나뉘어진다. 여기 빔은 THz 발생 소자(THz emitter)에 조사되어 THz파를 발생시킨다. 발생된 THz 빔은 THz 빔 광학계에 의해 유도되어 계측 소자에 조사된다. THz 빔 광학계는 THz 빔을 반사, 집속하기 위한 광학계로서 off-axis parabolic 거울이나 고저항 실리콘 렌즈 등으로 구성된다. 한편, 검출 빔은 광 지연기를 지나 THz 계측기(THz detector)에 조사되어 THz 펄스의 계측에 이용된다. 광 지연기는 다음 절에 후술하는 THz 펄스의 검출에 필수적인 장비로서 선형 모터 스테이지에 두 개의 반사 거울을 설치하여 구동하는 방식이 일반적이다. 이와 같은 전체 시스템을 구성함에 있어



[그림 1] 펄스형 THz 발생 및 계측 시스템의 개략도

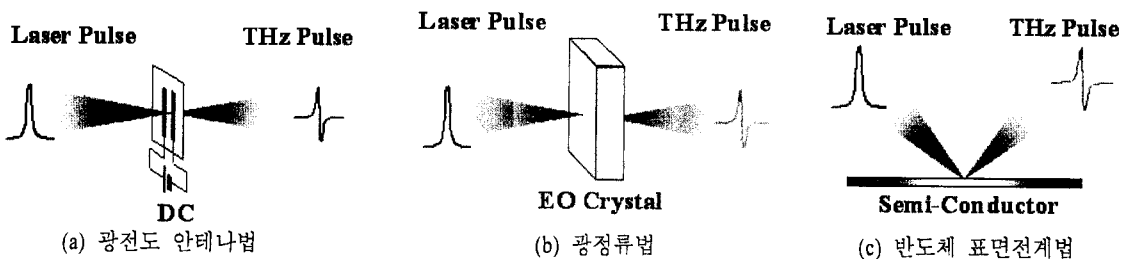
가장 유의할 점은 빔 분배기에서 나누어진 여기 빔과 검출 빔이 THz 계측기까지 도달하는 광로 길이를 잘 맞추어 주어야 THz 펄스의 계측이 가능하다는 점이다. 즉, 여기 빔이 빔 분배기에서 THz 발생 소자까지 이르는 거리와 발생된 THz파가 THz 계측기까지 전파되는 거리의 합이, 검출 빔이 광 지연기를 거쳐 THz 계측기까지 이르는 거리와 같도록 잘 맞추어 주어야 한다. 위에서 설명한 장치 외에 전체 시스템을 구성하기 위해서는 미약한 THz 펄스 신호를 계측하기 위한 전류 전치 증폭기(current pre-amplifier), lock-in amplifier 등이 필요하며, 광전도 안테나를 사용할 경우 안테나 바이어스용 전원, 광 지연기를 구동하기 위한 구동 전원 등이 필요하다. 그리고 광 지연기와 시료 홀더 등을 제어하고 THz파 데이터를 수집하기 위한 컴퓨터와 프로그램이 요구된다.

펄스형의 THz 발생 소자에 적용되는 대표적인 방

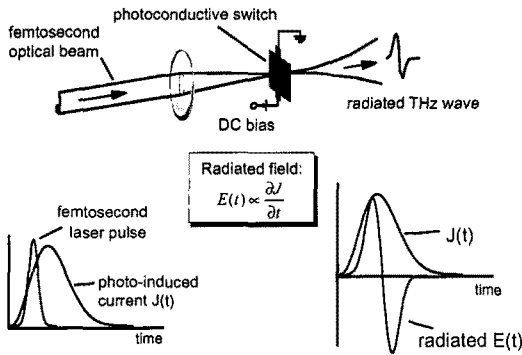
법으로는 광전도 안테나법(photoconductive antenna: PCA), 광정류법(optical rectification: OR)과 같은 비선형 광학적 방법 그리고 반도체 표면 전계(surface-field of semiconductor)를 이용하는 방법 등이 있으며, [그림 2]에 개념도를 나타내었다. 한편, THz 계측 방법으로는 광전도 안테나와 전광 샘플링(electro-optic sampling: EOS)이 주로 사용되고 있다.

### 2-1 광전도 안테나 THz 펄스 광원 및 검출기

광전도 안테나에 의한 THz파의 발생을 위해서는 광전도체를 기반으로 한 동면 스트립 라인(coplanar strip line)에는 DC 바이어스 전압이 인가되며 광전도 안테나에 의한 THz 펄스의 발생 원리는 [그림 3]에 나타내었다. 반도체의 밴드 갭 에너지(GaAs 반도체의 경우,  $E_g=1.43$  eV)보다 큰 광자 에너지를 갖는 펄스 광의 광펄스가 광전도 갭을 여기시키면 레이저 조사점에 전자와 정공이 전도대와 가전자대에 각각 생성된다. 캐리어들(전자와 정공)은 인가된 바이어스 전압에 의해 가속되고 캐리어 수명에 의해 결정되는 시정수에 따라 소멸한다. 이때 서브-피코초의 광전류 펄스가 광전도 안테나에 흐르게 되고, 광전도 안테나 사이의 이 순시 전류는 Maxwell의 전자파식에 의해 결정되는 서브-피코초의 전자기파(THz 펄스)를 자유공간에 방사하게 되고, 이때 원거리 방사파(far-field radiation)는 안테나에 흐르는 전류의 시간 변화에 비례하게 된다.

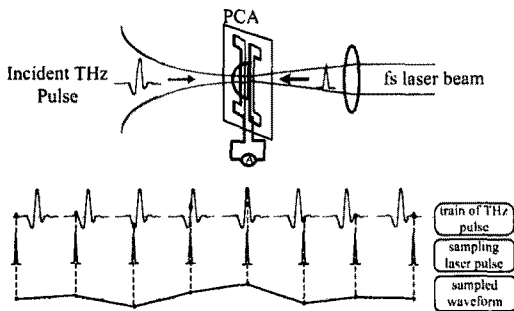


[그림 2] 펄스형 THz 발생 기술



[그림 3] 광전도 안테나에 의한 THz파 발생 원리도

[그림 4]에 광전도 안테나에 의한 THz 펄스의 측정 원리를 나타내었다. 검출용 안테나에서는 발생용 안테나의 DC 바이어스 대신에 전류계를 전극사이에 연결하고, 검출용 레이저 빔에 의해 발생된 캐리어들이 THz 펄스 전기에 의해 양전극으로 이동할 때 흐르는 전류를 측정함으로써 THz 전기의 세기를 유추하는 방법을 사용한다. 이때 THz 펄스와 검출용 레이저가 검출용 안테나에 도달하는 시간차를 광 지연기를 이용하여 미세하게 조정함으로써 THz 펄스의 각 지점에서의 전계를 광학적으로 샘플링함으로써 전체적인 THz 펄스의 형상을 얻을 수 있다. 측정시의 시간 분해능은 사용한 반도체 기판의 캐리어 수명과 샘플링 레이저 펄스(검출펄스)의 펄스 폭에 의존한다. 신호대 잡음비를 개선하기 위하여 펌프 빔은 기

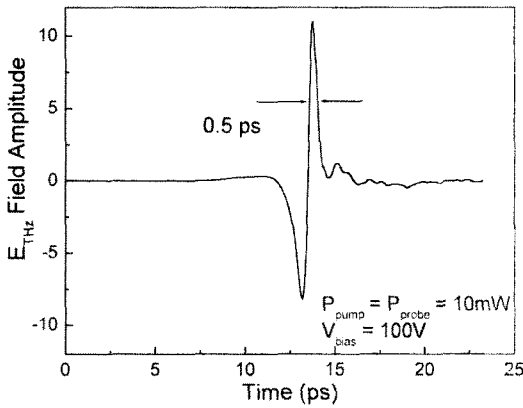


[그림 4] 광전도 안테나에 의한 THz파 측정 원리도

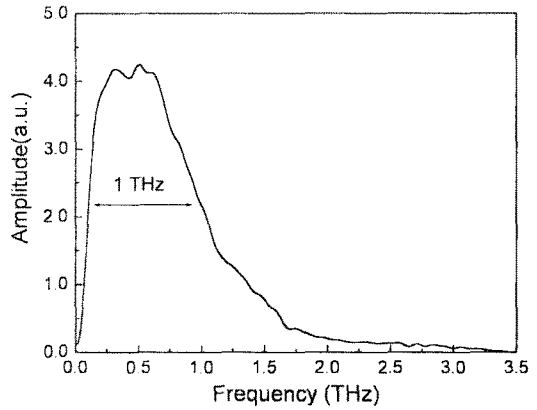
계식 초퍼(mechanical chopper)를 이용하여 수 kHz로 변조시키고 검출기 안테나로부터의 출력 신호는 Lock-in Amplifier를 이용하여 측정한다.

그 동안 다양한 형상의 안테나 구조가 THz 펄스의 발생과 검출을 위하여 시도되었으나, 제작의 용이성과 출력면에서 우수한 특성을 보이는 동면 스트립 라인 안테나 구조가 가장 많이 사용되고 있다. 발생기와 검출기 안테나는 일반적으로 저온 성장 GaAs (LT-GaAs) 박막 위에 형성되는데 LT-GaAs 박막은 매우 높은 항복전계( $\sim 5 \times 10^5$  V/cm), 피코초 이하의 캐리어 수명, 높은 비저항( $\sim 10^7$   $\Omega$ cm)과 더불어 비교적 높은 이동도( $\sim 200$   $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )를 가지고 있어 광전도 안테나를 만들기 위한 최적의 재료로 알려져 있다. LT-GaAs 막은 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy)의 방법으로 보통 SI-GaAs 기판 위에 250도의 저온으로 성장한 후 600도에서 10분간 열처리하며 안테나의 금속 스트립 라인은 Au/Ni, Au/Ti 등의 박막을 주로 사용한다.

광전도 안테나로부터 발생된 THz파 펄스의 전형적인 파형과 스펙트럼의 예는 [그림 5]에 나타내었다. 발생용 안테나는 갭 간격이 80  $\mu\text{m}$ 이며, 검출기 안테나는 갭 간격 5  $\mu\text{m}$ 이다. 안테나 전극 사이의 바이어스 전압은 80 V( $E_b=10$  kV/cm)이며, 펌프와 검출을 위한 레이저 출력은 10 mW이다. 주펄스의 반폭치(FWHM)는 약 0.21 ps로 측정되었으며, THz 신호의 신호대 잡음비(SNR)는 5,000:1 이상으로 나타났다. 주파수 영역의 스펙트럼은 0.9 THz 부근에서 최대를 보이고, 4 THz 이상까지 뻗어 있음을 알 수 있으며, 스펙트럼의 반폭치는 약 1.5 THz이다. 광전도 안테나 방식의 THz 발생에서 THz파의 출력은 안테나 자체의 특성과 여기용 레이저 빔의 특성에 의하여 결정된다. 광전도 안테나로부터의 THz 전기의 세기는 반도체에 열적인 문제가 절연 파괴가 발생하기 전까지는 바이어스 전압과 펌프 레이저 강도에 선형적으로 비례하지만 레이저 출력이 계속 증가하면



(a) THz 펄스 파형과



(b) 주파수 스펙트럼

[그림 5] 광전도 안테나

포화하는 경향을 보인다. 이와 같은 포화 현상은 여기된 광 캐리어가 바이어스 전압을 차폐하는 현상이 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 즉, 반도체 표면에 과잉 생성된 전자와 정공이 안테나의 양극과 음극으로 이동하게 되면 이들 대전 입자의 분리에 따른 전계가 형성되고, 이 전계는 외부에서 인가하는 바이어스 전계와는 반대 방향을 취함으로써 외부 전계를 차폐하는 효과를 나타내게 되어 펄스 출력이 포화되는 현상이 발생하게 된다.

## 2-2 비선형 광학적 방법에 의한 THz 펄스 광원

펨토초 정도의 극초단 펄스 레이저가 비선형 광학 매질에 입사되면 주파수가 THz 영역인 전자기파가 발생하게 되는데, 이는 주로 광정류 작용에 의한 것으로서 광전도 안테나와 함께 THz 펄스 발생에 가장 많이 쓰이는 방법이다. 비선형 물질을 이용한 THz파 발생에 사용되는 또 다른 방법으로는 차주파수 발생(Difference Frequency Generation: DFG)이 있으며, 최근에는 주기적으로 분극 반전된 준위상 정합 광소자에서 연속 발진 레이저와 인근 파장을 갖는 나노초 대역의 레이저를 주로 이용하여 연구가 진행 중이다<sup>[1][2]</sup>.

광정류는 2차 전기감수율 계수( $\chi^{(2)}$ )를 가지는 물질에서 발생하는 2차 비선형 효과로서, 극초단의 레이저 펄스가 비선형 광학 결정에 조사되면 결정 내 순시 분극(transient polarization)을 유기하고, 이러한 순시 분극의 2차 시간 미분에 비례하는 전자기파를 방사한다. 현재까지 GaAs, LiTaO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, DAST, ZnTe 등의 여러 가지 결정에 대해서 광정류에 의한 THz파의 발생이 확인되었으나, 이러한 결정 중에서 ZnTe 결정이 화학적으로 안정적이고, 비교적 큰 전기광학계수(electrooptic coefficient=4.04 pm/V)를 가지고 있으며, THz파와 펄프용(검출용) 가시광과의 군속도 정합성( $n(800\text{ nm})=2.853$ ,  $n(300\ \mu\text{ m})=3.178$ ) 면에서 우수한 성질을 가지고 있어서, 최근에는 광정류를 이용하는 대부분의 시스템에서 ZnTe 결정을 사용하고 있다. 광전도 안테나 방식과는 달리 시간 영역의 파형에서는 여러 주기에 걸친 진동이 관찰되며, 일반적으로 펄스폭도 반폭치가 더 넓다. 한편, 스펙트럼은 반폭치가 2 THz 정도로 넓게 얻어지며, 중심 주파수도 1~2 THz로 높게 나타난다.

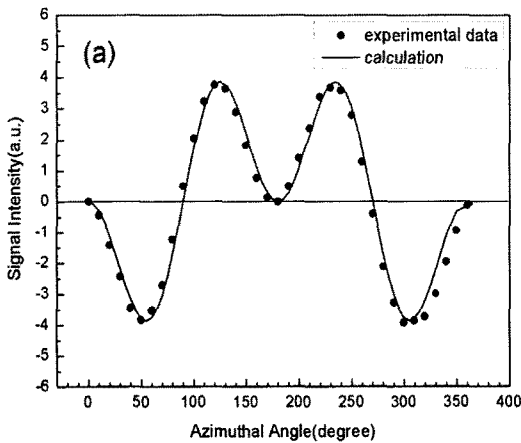
비선형 결정에서의 광정류에 의해 발생된 THz 펄스의 파형과 대역폭은 여기 레이저 펄스의 시간적 형상(펄스폭)과 대역폭, 동시에 전파해 가는 광과 THz

파의 결정 내에서의 위상 비정합(mismatch) 그리고 결정 내에서의 THz파 흡수 등에 의해 결정된다. 따라서 결정의 두께 변화는 위상의 비정합 정도와 THz파의 흡수에 영향을 미친다. 결정의 두께가 증가하면 펄프 빔이 긴 광로를 진행하면서 더 많은 수의 광자가 광정류에 기여하여 THz파의 전계가 커지는 반면 THz파의 흡수도 증가하고 위상 정합도도 감소하게 된다. 또한, 광정류에 의한 THz파의 발생은 결정의 방위(orientation)에 의해 강하게 영향을 받는다. 쌍극자 근사에 의하면 원거리장에서의 THz 전자기파의 전계는 광유도 분극의 2차 시간 미분에 비례한다. 광정류에 의한 THz파의 발생시, GaAs, CdTe, InP, ZnTe와 같은 첨아연광(zinc-blende) 결정들에 대한 레이저 빔의 편광 방향과 결정의 방위에 따른 THz파의 변동에 대한 이론적, 실험적 연구들이 진행되었다. 광원과 검출기 모두에 ZnTe 결정을 이용하여 결정의 방위에 따른 THz파의 변화를 측정하였다. 레이저의 편광 방향은 고정하고, 이미터와 검출기의 ZnTe 결정을 회전시키면서 THz파 신호의 피크값을 측정하였다. [그림 6]은 펄프 빔 레이저의 편광 방향과 ZnTe(110) 결정의  $\langle 0,0,1 \rangle$  방향 사이의 방위각( $\theta$ )을

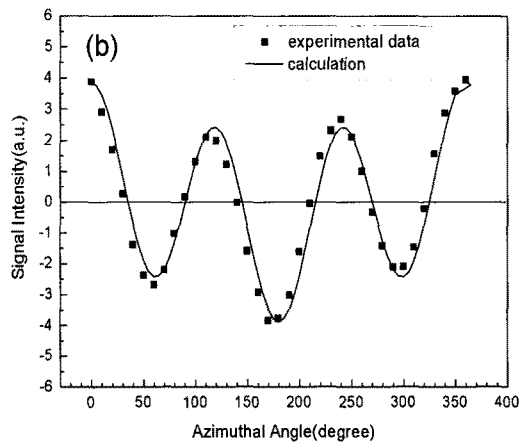
변화시켰을 때의 THz파의 변화를 보여준다.

광정류와 비교하여 광전도 스위칭의 가장 큰 장점은 그것이 가진 훨씬 큰 효율에 있다. 이는 광정류가 비선형계수에만 의존해야 하는 것과 달리 광전도 스위칭은 매우 높은 전압에 의해 저장된 전기 에너지가 레이저 펄스에 의한 매우 빠른 스위칭에 의하여 순간적으로 방출되기 때문이다. 그러나 광정류는 극히 순간적으로 일어나는 순수한 광학적 현상이기 때문에, 수 THz에 한정되는 주파수 대역을 가진 광전도 스위칭과는 달리 거의 중적외선 영역인 50 THz 정도의 초광대역 주파수까지도 발생할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 또 다른 비선형 광학적 방법은 차주파수 발생 방법이다. 이 경우, 극초단 펄스 레이저의 스펙트럼 선폭이 매우 넓기 때문에 그들 상호간의 서로 다른 주파수 성분들에 의해서 만들어지는 전자기파의 주파수는 테라헤르츠 대역이 된다<sup>[1]</sup>. 최근에는 분극 반전된 광소자의 주기에 따라서 차주파수 발생 조건이 조금씩 달라지는 것을 이용하여 생성된 테라헤르츠 펄스의 주파수 선폭이 10~20 GHz 내외로 매우 좁게 만드는 것이 가능하며,



(a) 펄프광의 편광 방향과 평행인 THz파의 성분



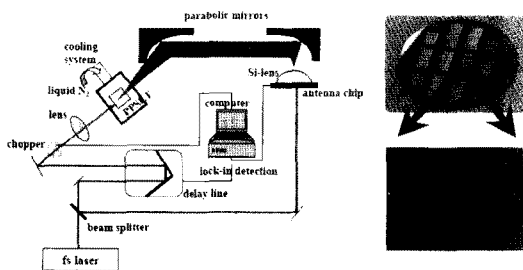
(b) 펄프광의 편광 방향과 수직인 THz파의 성분

[그림 6] ZnTe(110) 결정의  $\langle 001 \rangle$  방향과 펄프광의 편광 방향이 이루는 방위각에 따른 THz파 신호의 크기 변화

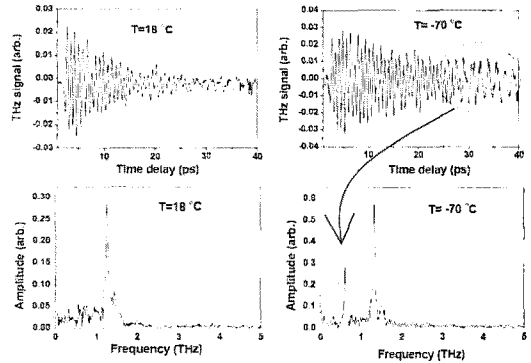
이 경우 주파수 가변이 가능한, 높은 첨두 출력을 갖는 파장가변형 테라헤르츠 광원 개발이 가능하다<sup>[2]</sup>.

기본적으로 차주파수 발생에 의해서 생성된 테라헤르츠파는 에너지 보존과 파수벡터 보존에 의해서 펄프광의 진행과 같은 방향으로의 순방향 발생과 역행하는 역방향 발생 두 가지가 동시에 가능하다. [그림 7]은 준위상 정합(quasi-phase matching) 구조를 이용한 테라헤르츠파 발생과 검출에 관한 실험 개략도와 리튬나이오베이트(periodically pole LiNbO<sub>3</sub>: PPLN) 준위상 정합 구조의 사진이다. 주기적으로 분극 반전된 광소자에서는 분극이 반전되면서 형성된 비선형계수의 주기적인 반전 때문에 펄프광과 테라헤르츠파간의 시간적인 벌어짐을 적절히 조절할 수 있게 된다. 따라서 발생된 테라헤르츠파는 전파한 매질의 길이 정보를 그대로 보유하면서 분극 반전된 도메인의 숫자에 해당하는 만큼의 다중 펄스 형태를 가지게 된다.

[그림 8]은 주기가 60  $\mu\text{m}$ , 전체 길이가 2 mm인 PPLT를 사용하여 상온과 저온에서 수행한 테라헤르츠 발생 실험 결과이다<sup>[3]</sup>. 발생된 테라헤르츠파의 검출을 위해서는 광전도 안테나를 사용하였다. PPLN을 이용한 경우에도 비슷한 결과를 얻을 수 있고<sup>[4]</sup>, 특히 저온의 경우 발생 효율이 증가하며, 또한 온도에 따른 주파수 변화가 가능하다. 저온에서의 효율



[그림 7] 펄프초 레이저를 이용한 실험 장치도(좌) 및 광소자 제작용 3인치 웨이퍼의 패턴 사진 및 제작된 PPLN 소자의 현미경 사진(우)



[그림 8] PPLT (길이: 2 mm, 주기: 60  $\mu\text{m}$ ) 소자를 이용한 테라헤르츠파의 시간축에서 검출(상)과 푸리에 변환에 의한 대응하는 테라헤르츠 주파수(하)

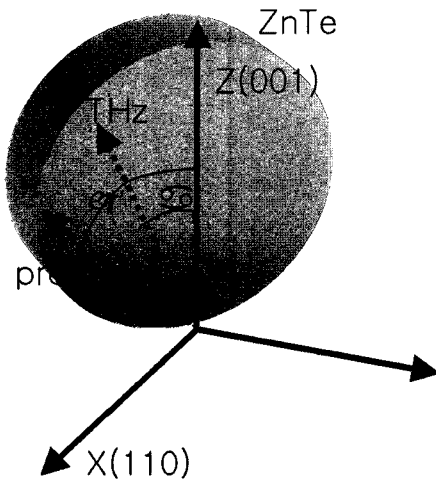
증가는 물질이 갖는 포논에 의한 테라헤르츠파의 흡수가 저온에서 현저하게 줄어드는 것에 기인하며, 온도에 따른 굴절률 변화에 의해서 차주파수 발생 조건에 따른 파장 가변이 가능한 순방향 및 역방향 테라헤르츠파도 동시에 발생시킬 수 있다. 이러한 준위상 정합 광소자를 이용한 테라헤르츠파 광원은 동시에 두 개의 주파수 대역이 발생 가능하기 때문에, 이를 이용한 이중 파장(dual-wavelength) 상관 관계나 간섭, 이미징 등의 응용실험에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 2-3 전광 샘플링 검출

전광 샘플링 검출은 선형적인 전광 효과인 포켈 효과(Pockel's effect)를 사용하는 검출 기술로서 probe 레이저가 전광 물질을 통과할 때의 위상 변화를 측정함으로써 가능한 기술이다. 전광 물질의 x, y, z축에 대한 굴절률의 형태에 따라 물질을 통과하는 빛의 방향은 굴절률 방정식에 따라 결정된다. 만약 각축에 대한 굴절률 값이 같다면 굴절률 방정식은 원의 방정식을 나타내지만, 다를 경우에는 타원의 방정식이 된다. 전광 물질을 통과하는 probe 빔의 위상 변

화는 입사된 THz파의 전기장과 전광 물질의 전광계수, probe 빔의 파장, 굴절률, 전광 물질의 두께 등으로 정해지는 간단한 수식으로 나타낼 수 있다.

전광 물질에 입사된 THz 빔의 z축에 대한 각도와 probe 빔의 z축에 대한 각도 사이의 값에 의한 굴절을 변화는 [그림 9]에 보인 것과 같이 두 번의 회전 변환을 통하여 각 축 성분의 편광 세기 차이를 보이게 된다. THz 빔에 의해 유도된 굴절을 변화가 없을 때는 원형 편광이 되도록 맞추어진 1/4 waveplate를 통과하면서 원형 편광이 되지만 THz 빔에 의해 굴절을 변화가 일어나는 경우에는 타원 편광이 되게 된다. 이렇게 변화된 편광 특성이 최종적으로 편광 빔 분배기(polarizing beam splitter)를 통해 편광 성분별 전압 신호로 바뀌게 되고, 투과된 probe 빔의 각 편광 성분의 세기 차는 THz 빔의 전기장 세기로 환원되어, 최종적으로 시간 영역에서의 THz 펄스 파형이 얻어지게 된다. 이러한 전광 샘플링은 광전도 안테나에 비하여 매우 넓은 수십 THz 정도의 측정 대역폭을 가지는 큰 장점을 가지고 있다. 단, 신호대 잡음비의 경우 광전도 안테나에 비하여 작다는 단점도 가지고 있다.



[그림 9] 전광 물질의 z축과 THz 빔, probe 빔의 각도

## 2.4 고속 광 지연기를 이용한 테라헤르츠 펄스의 실시간 계측

서브피코초의 테라헤르츠 펄스를 직접적으로 측정하기 위해서는 샘플링률(sampling rate)이 적어도 100 THz 이상의 오실로스코프와 같은 계측 장비가 필요하나 아직까지 이와 같은 속도의 전자 계측 장비는 개발되지 못하였다. 따라서 서브 피코초의 테라헤르츠파 펄스의 측정은 발생법과 연계하여 “pump & probe”법이 개발되어 사용되고 있다. THz 펄스의 파형 또는 시간에 따른 전계 변화를 측정하기 위해서는 펌프 펄스에 대한 검출 펄스의 시간 지연을 조절함으로써 측정된다. 즉, 검출용 안테나에 도달하는 테라헤르츠파에 대한 검출용 레이저 빔의 도달 시간을 미소하게 제어함으로써 테라헤르츠파의 특정 시점에서의 전계값을 읽을 수 있다. 여기에서 테라파와 검출용 레이저 사이의 지연 시간을 조절하는 기능을 광 지연기(optical delay line)가 담당하고 있으며, 검출용 레이저 빔의 지연 시간을 THz 펄스의 처음부터 끝까지에 해당하는 시간동안 순차적으로 변화시켜 각각의 지연 시간에서 얻은 값들을 재조합함으로써 원래의 THz 파형을 파악할 수 있다.

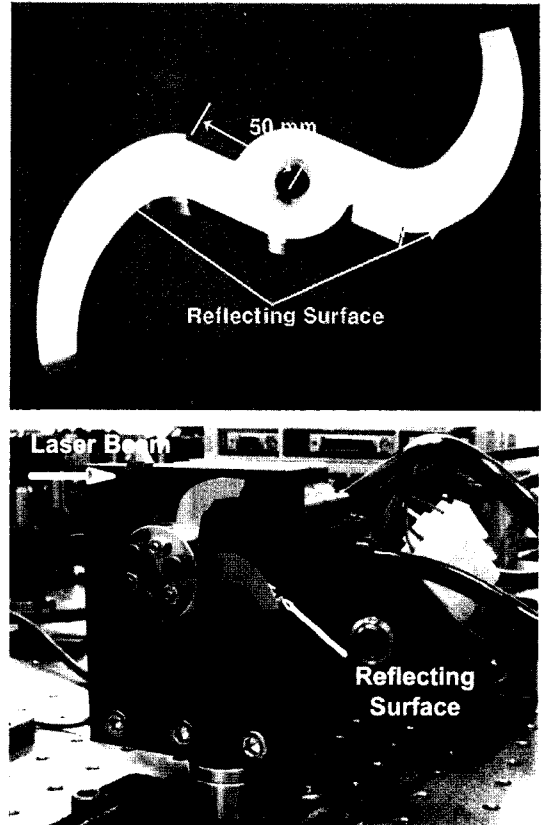
기존의 광 지연기는 주로 선형 모터 스테이지에 두 개의 반사 거울을 설치하여 광 지연을 시키는 시스템이 사용되었다. 이 경우, 모터의 각 스텝에서의 신호를 측정하기 위하여 모터를 미세 구간씩 이동 및 정지를 반복하여야 하므로 펄스 전체를 측정하기 위해서는 수십초에서 수분의 시간이 소요된다. 스케닝방법에 의한 테라헤르츠파 이미징을 위해서는 수백에서 수천개의 픽셀에 대해서 펄스를 측정해야 하는데, 이 방법을 통해서 하나의 이미지를 얻기 위해서는 수십분에서 수십시간의 시간이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 광 지연기를 빠른 속도로 스캔하면서 테라헤르츠파를 측정하는 방법이 제안되었다. 본 절에서는 고속으로 광 지연을 발생시킬 수 있는 장치로서 갈바노메타(galvanometer)를



이용한 진동하는 역반사체를 이용하는 방법[(진동형 광 지연기), 회전하는 비구면 반사체(회전형 광 지연기)]를 이용하는 방법에 대해서 소개한다<sup>[5],[6]</sup>.

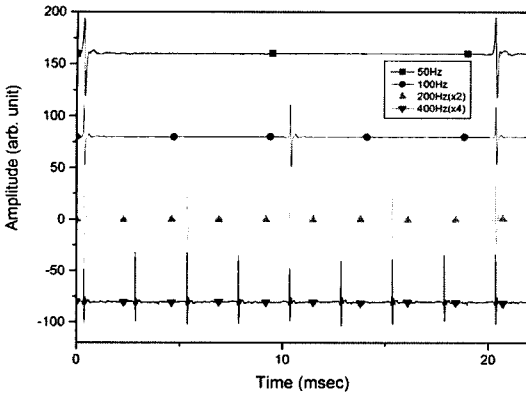
본 연구에 사용된 진동형 광 지연기는 Clark-MXR, Inc에서 제작한 ODL-150 모델이며, 광 지연기 본체와 구동용 전원 장치로 구성되어 있다. 이 광 지연기는 최대 150 ps(최대 변위 2.25 cm)의 지연 시간을 가지며, 최대 스캔 주파수는 100 Hz까지 가능하다. 스캔 주파수 및 진폭은 광 지연기 구동 장치의 트리거 신호 및 구동 전압에 의해서 결정된다. 진동형 광 지연기를 20 Hz로 진동시키면서 측정된 실시간 파형을 측정했다. 데이터 획득(DAQ) 보드의 샘플링률은 100 kS/s로 설정하였으므로 측정된 데이터 사이의 실제 시간 간격은 10 us가 되며, 전체 측정 시간은 100 ms(10,000 point)가 된다. 그러나 진동형 광 지연기에서 광 지연을 발생하는 역반사체는 sine 함수적으로 운동을 하므로, 그 변위가 선형적으로 변화하지 않기 때문에 정확한 광 지연을 계산하기 위해서는 복잡한 과정을 거쳐 보정(calibration)해야 하는 문제점이 있다. 또한, 진동 주파수를 올리게 되면 내장된 갈바노메타의 용량이 제한되어 있어 진폭이 감소하는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 회전하는 반사체를 이용한 회전형 광 지연기를 고안하였다. 이 광 지연기에 부착되는 반사체는 회전하는 원 주위에 반사를 일으키는 곡면을 부착하여, 이 곡면이 회전하면서 곡면으로부터 반사된 레이저 빔의 광로차가 곡면의 회전 각도와 회전하는 원의 반경에 비례하도록 설계되었다( $\Delta l = 2r\theta$ ,  $r$ : 원의 반경,  $\theta$ : 회전각). 원 주위에 부착되는 회전 곡면의 수를 증가시킴으로써 스캔 반복률을 높일 수 있으며, 곡면의 길이와 원의 반경을 크게 함으로서 광 지연거리를 자유롭게 확장할 수 있다. [그림 10]은 반경 5 cm, 회전 각도 10~130도인 두 개의 날개를 가진 회전형 반사체를 보인다. 이 반사체를 이용하여 500 ps의 광 지연거리를 얻을



[그림 10] 회전형 광 지연기의 볼록 비구면 반사체

수 있었고, 선형 모터 스테이지와 비교를 통하여 광 지연 거리가 선형적으로 변화함을 알 수 있었다. 또한, [그림 10]은 테라헤르츠파 펄스의 고속 실시간 측정을 위해서 6개의 반사 날개를 가진 반사체를 고속의 서보 모터에 부착한 회전형 광 지연기를 보인다. 고속의 서보 모터의 회전 속도를 조절함으로써 펄스 스캔 주파수를 조정할 수 있으며, 초당 400개의 테라헤르츠파 펄스를 스캔함으로써 테라헤르츠파를 실시간 측정된 결과가 [그림 11]에 나타나 있다. 회전형 광 지연기는 상용의 광 지연기에 비해 구조가 비교적 간단하며 저가로 제작이 가능하며, 광 지연 거리가 스캔 주파수에 독립적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나, 반사 곡면이 비구면이기 때문에 가공이



[그림 11] 스캔 주파수에 따른 테라헤르츠 펄스의 변화

어렵고, 레이저 빔의 정렬이 어려운 문제점이 있어 개선이 요구된다.

### III. THz 수동 소자

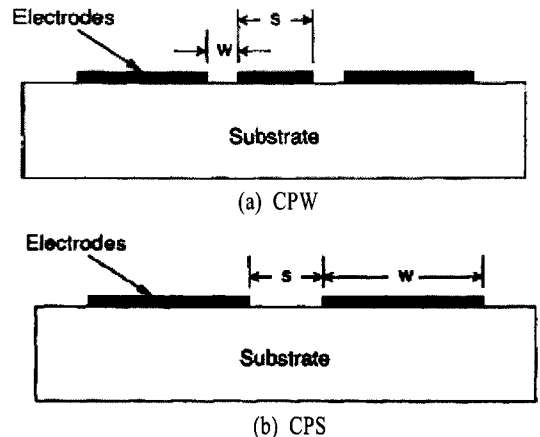
THz 대역의 광원 개발과 함께 THz파의 실질적인 응용에는 필히 수동 소자의 개발이 필요하다. 그러나 그 동안 대부분의 THz파 실험은 렌즈나 거울을 이용한 준광학적(quasi-optical) 방법을 이용하였기 때문에 상대적으로 THz 대역의 수동 소자에 대해서는 THz 광원에 비하여 연구가 활발하게 이루어지지 못한 것이 사실이다. 도파로, 분배기, 필터, 공진기와 같은 THz 수동소자는 아직 시기상조이기는 하나 미래의 THz 집적 회로를 구성하는데, 실질적으로 매우 중요한 역할을 하게 될 것이며, 특히 도파로의 경우 기판 내부나 기판들 사이에서의 근거리 전송, 장비들 간의 전송에 있어서 반드시 개발되어야 할 부품이다. 본 절에서는 현재까지 시도된 THz 도파로를 중심으로 살펴보고자 한다.

#### 3.1 평면 전송선

평면 전송선(Coplanar Transmission Line, CTL)은 크기가 작고 집적화 할 수 있어서 THz 집적회로 설

계에 중요한 역할을 하게 된다. 주파수가 증가하면 CTL은 복사 손실이 커지는 단점이 있지만 THz 대역의 파장이 마이크로파 대역에 비하여 훨씬 작기 때문에 제작된 회로의 크기가 작아져서 상대적으로 손실을 어느 정도 보상할 수 있다. 또한, 무엇보다 중요한 것은 현재의 반도체 공정 기술로 THz 대역에서 동작하는 CTL을 충분히 제작할 수 있다는 것이다. 그러나 THz 펄스를 이용하는 시스템의 경우에는 적절한 설계도와 측정 기술을 가지고 THz 대역에서의 CTL의 손실과 분산 특성을 정밀하게 측정하고 분석해야 할 필요성이 있다.

[그림 12]는 현재까지 연구가 진행된 CTL 중에서 가장 대표적인 구조인 CPS(Coplanar Stripline)와 CPW(Coplanar Waveguide)의 단면도를 보여주고 있다. [그림 12](a)의 CPW는 기판 위에 평행한 3개의 금속 전극을 증착시켜 제작한 것이고, [그림 12](b)의 CPS는 2개의 전극을 증착시켜서 제작한다. CPW와 CPS에서 발생하는 손실(loss)은 기판에서 발생하는 유전체 손실(dielectric loss), 전도 손실(conduction loss) 그리고 복사 손실(radiation loss)을 들 수 있다. 이론적인 계산과 함께 실제 측정을 하면 THz 대역에서는 기존의 마이크로파 대역에서와는 대조적으로 위의 세 가



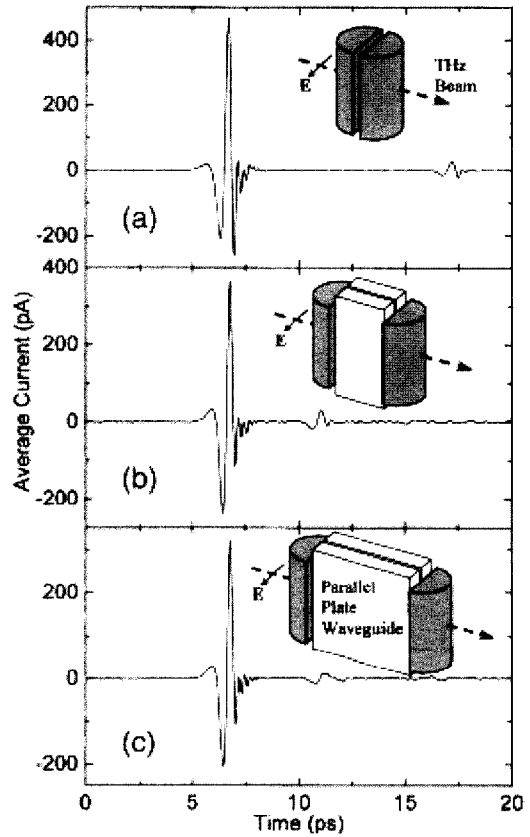
[그림 12] THz 평면 전송로

지 손실 중 가장 큰 것은 복사 손실이고, 그 다음이 전도 손실이라는 것을 알 수 있다. 유전체 손실은 다른 두 손실에 비해서 상대적으로 매우 작아 보통 무시할 수 있다. 따라서 THz 대역에서 CTL을 이용한 회로를 설계하고 구성할 경우에는 이러한 특성을 잘 고려해야 할 필요가 있다.

### 3-2 금속 평판 도파로

금속 도파로는 기존의 마이크로파 대역에서 그 기능의 우수성과 편리성 때문에 가장 광범위하게 사용되고 있는 도파로이며, 단면의 모양에 따라 원기둥 도파로와 사각형 도파로 그리고 평행판 도파로(parallel plate waveguide) 등이 있으나, 이러한 금속 도파로는 THz 대역에서 거의 사용되지 않고 있다. 그 이유는 금속 도파로의 손실이 주파수가 THz 대역까지 증가하면 급격히 증가하고, 특히 THz 파장에 맞추어 작아진 구조 때문에 기존의 제작 방법이 적합하지 않다는 문제가 있기 때문이다. 그러나 최근에는 이러한 금속 도파로를 THz 대역에 사용하려는 몇 가지 새로운 연구 결과가 보고되고 있으며, 그 중에서 가장 작은 분산(dispersion)을 보이고 있는 것은 평행판 도파로이다<sup>[7]</sup>.

THz 대역의 도파로의 특성에 대한 측정은 마이크로파 대역과는 달리 준광학적 방법으로 THz 신호를 도파로 앞에 있는 렌즈를 이용한 도파로에 집속하며, 도파로를 통해 진행한 신호는 뒤에 있는 렌즈를 통해 모여져 검출기를 통해 측정된다. 도파로 양쪽의 렌즈는 도파로 결합 효율을 높이기 위해 사용하되 입력 신호 자체는 도파로를 제거한 상태에서 측정한다. [그림 13](a)는 도파로를 제거하고 측정된 입력신호이고, [그림 13](b), (c)는 각각 짧고 긴 평행판 도파로를 따라 전송된 THz 신호의 진폭 스펙트럼이다. 기존의 THz 도파로와 다른 점은 분산이 거의 일어나지 않는다는 것이며, 손실 또한 매우 작다는 장점을 가지고 있다. 또한, 금속 평행 도파관을 이



[그림 13] Parallel plate waveguide (a) 투과된 THz 신호, (b) 짧은 거리, (c) 긴 거리 투과된 스펙트럼<sup>[7]</sup>

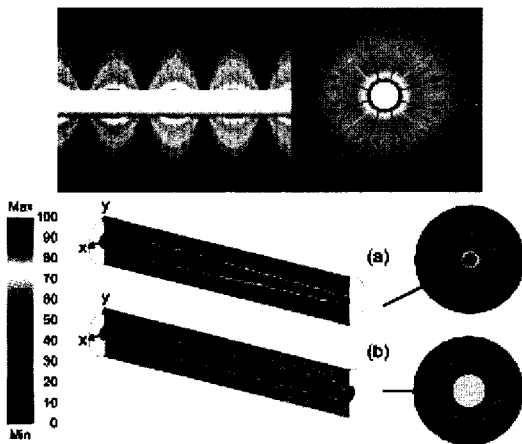
용한 THz 파의 도파시는 공기 중을 통과하는 THz파를 이용한 THz-TDS보다 더 큰 에너지를 평행판 사이에 집중시킬 수 있기 때문에 biosensing, chemical materials, photonic waveguide 그리고 THz surface plasmon 등 많은 분야에서 응용되어질 것으로 전망된다.

### 3-3 금속선 도파로

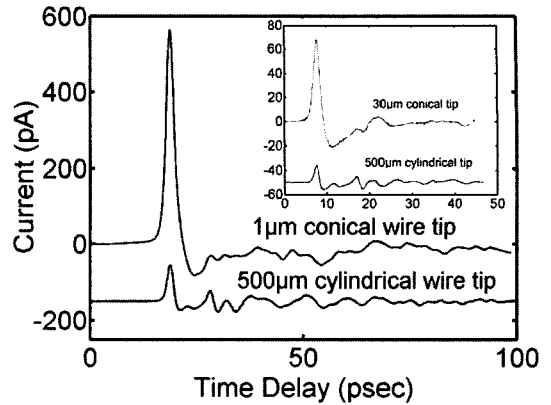
피복이 없는 순수한 금속선 도파로(metal wire waveguide)에 대한 연구는 1950년도에 Sommerfeld에 의해서 밀리미터파 영역에서 최초로 수행되었고, 따라서 금속선의 도파 모드는 Sommerfeld wave라고 부르고 있다. 그러나 그 이후 거의 50년 동안 관심을 받

지 못하다가 최근에 D. Grischkowsky 교수에 의해 THz파의 흡수율과 군속도 분산이 거의 없는 전송이 가능하다는 것이 알려지며, 다시 활발히 연구가 시작되고 있다<sup>[8]</sup>.

금속선 도파로 모드 연구를 위한 THz파 발생과 검출의 경우, LT GaAs 대신에 SOS(Silicon On Sapphire) chip의 광전도 안테나를 사용하는 경우가 많은데, 이는 SOS chip이 광학적 투명도가 좋아 레이저 빔을 chip의 뒷면에서 안테나가 있는 앞면으로 조사할 수 있기 때문이다. [그림 14]는 금속선 도파로의 TM<sub>01</sub> 모드에 대한 전기장 분포를 나타낸다. 금속선 도파로 모드는 앞서 언급했듯이 흡수율과 군속도 분산이 거의 없는 형태로 계산되며, 실제로 실험 시에도 비슷한 결과가 측정된다. 또한, 측정된 THz 신호의 크기를 크게 증가시키기 위하여 도파로로 사용된 금속선 끝단의 직경을 원통형에서 원뿔형으로 변화를 시키는 것이 가능하며, [그림 14](a)와 같이 금속선 끝단을 원뿔형으로 작게 가공하면 [그림 14](b)와 같은 일정한 지름을 가진 경우와 달리 금속선을 통하여 전송되던 THz파 필드가 그 끝단에서 집중되어 검출되는 신호가 커지게 된다. [그림 15]는 실험으로 얻은 시간 영역의 THz 전자기파로서 끝단의 직경이 1 μm



[그림 14] 금속선 주위의 THz field 분포



[그림 15] 검출된 시간 영역의 THz파

인 텅스텐 금속선을 사용했을 때 500 μm의 텅스텐 금속선을 사용했을 때보다 peak to peak 값을 기준으로 5.3배 큰 THz 신호를 검출하였던 것을 보여준다<sup>[9]</sup>. 이는 금속선의 표면을 통하여 전파되는 THz pulse의 검출을 향상시킨 결과로 향후 개발될 THz waveguide 센서 및 이미징 시스템에도 많은 기여를 할 수 있을 것이라 기대한다.

최근에 자유롭게 공기 중을 전파하는 THz파를 여러 모양의 도파관, 즉 circular, rectangular, single-crystal sapphire fibers 그리고 plastic ribbon planar 등을 이용하여 단일 모드의 결합과 전파가 가능함을 보였다. 하지만, 이러한 도파관들은 차단 주파수 근처에서 매우 높은 군속도 분산을 가짐에 따라 짧은 시간 내의 전파가 불가능하며, 또한 차단 주파수의 존재로 인해 좁은 스펙트럼 영역을 가지게 된다. 반면에 전송한 금속 평행판 및 금속선 도파로는 저손실 특성을 지니며 군속도 분산에 의한 펄스의 늘어지는 현상이 발생하지 않는 단일 모드의 전파가 더욱 용이한 장점을 가지고 있다.

### 3-4 THz 광결정 소자

최근 THz 소자 연구에 있어서 많은 주목을 끌고 있는 것은 광결정(photonic crystal)을 이용한 THz 수

동소자 연구이다. 단지, 기존의 방법과 다른 새로운 접근 방법이라는 것 이외에도 실제 응용 가능성이 매우 높고, 또한 기존에 사용되었던 구조로는 불가능한 새로운 기능을 가진 THz 소자의 제작이 가능하다는 점에서 앞으로 집중적으로 연구 투자가 이루어질 것으로 전망된다. 광결정은 Yablonovitch가 1987년에 제안한 이후로 그 특성이나 응용 분야에 대해서 전 세계의 여러 대학과 연구소들에 의해 활발하게 연구가 진행되어오고 있다. 광결정이란 유전율이 공간상에 주기적으로 변화하는 구조물을 말한다. 예를 들면 현재 광통신 소자에 이용되고 있는 DFB/DBR 레이저는 일차원 광결정을 이용한 광소자이다.

광결정의 특성은 주기적으로 전자가 배열되어 있는 반도체와 같은 결정과 그 특성이 유사하다. 즉, 결정 내에서 주기적으로 배열되어 있는 원자 때문에 전자가 밴드 갭을 갖는 것과 같이 주기적으로 변화하는 유전율에 의해 광자(photon)가 밴드 갭을 갖는 것이다. 따라서 반도체에 불순물을 넣어서 특성을 조절하듯이 광결정 또한 주기적인 구조에 결함을 인위적으로 넣어서 광자의 흡수와 방출과 같은 여러 가지 광특성을 조절할 수 있다. 결정의 결함(defect)을 이용하여 만들 수 있는 광결정을 이용한 소자에는 도파로, 필터, 스위치, 공진기 등이 있다. 이러한 광결정을 이용한 소자의 미래지향적 장점은 고집적도의 광결정 집적 회로를 만들 수 있다는 점이다.

최근에 광통신 대역(1.3~1.6  $\mu\text{m}$ )에서의 광결정에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 반면에 THz 대역의 광결정에 대한 연구는 아직 시작 단계에 있다. 그렇지만 THz 대역에서 광결정은 다른 대역에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있어 그 응용 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 우선 THz 대역이 갖는 장점은 광결정의 주기가 대략 100  $\mu\text{m}$  정도로서 제작하기에 적합하다는 것이다. 즉, 광통신 대역에서 광결정의 크기가 작아서 제작하기 힘들고, 마이크로파 대역에서 제작하는 광결정은 크기가 너무 커서 사용

하기 힘들지만, 두 대역 중간에 있는 THz 대역은 광결정의 주기가 크지도 작지도 않아서 현재의 반도체 공정 기술로도 제작하기 쉽다. 또한 광결정은 주파수에 따라 scaling할 수 있는 특징을 가지고 있어서 THz 대역에서 광결정을 분석하는 경우 다른 대역에서도 그 특성을 이용할 수 있게 된다.

광결정 섬유는 광결정을 이용한 광섬유이다. 광결정 섬유는 광결정에 도입된 결함(defect)의 종류에 따라 두 가지 메커니즘을 가지고 신호를 속박하여 전달한다. 첫 번째 메커니즘은 기존 광섬유와 같이 코어(core)와 클래딩(cladding) 사이에서 일어나는 TIR(Total Internal Reflection)를 이용하는 방법이다. 이 경우 광결정 섬유는 기존 광섬유와 달리 광결정을 클래딩으로 사용하게 된다. 두 번째 메커니즘은 광 밴드 갭 효과를 이용하는 방법이다. 이 경우 지금까지의 도파로와는 완전히 다른 메커니즘으로 신호를 구속하게 된다. 이러한 메커니즘으로 인해 광결정 섬유는 기존 광섬유가 갖지 않는 새로운 특성을 갖는다. 그 특성들을 살펴보면, 특이한 분산 성질을 갖게 되고, 넓은 주파수 대역에서 단일 모드만 진행하게 한다. 그리고 선형과 비선형성을 모두 극대화하여 이용할 수 있고, 모드 면적이 넓어서 큰 출력을 전송 가능하게 한다. 또한, 광 밴드 갭을 이용하면 유전율이 낮은 공기 혹은 진공을 통해 신호를 진행시킬 수 있어 손실이나 분산 특성을 향상시킬 수 있다.

THz 대역에서 광결정 섬유를 이용한 실험은 최근에 국내에서 이루어졌으며, 사용한 광결정 섬유는 플라스틱(HDPE)을 이용하여 제작되었다<sup>[10],[11]</sup>. 플라스틱을 사용한 이유는 앞에서 말한 바와 같이 THz 대역에서 광섬유보다 손실이 작기 때문이다. 플라스틱 광결정 섬유는 두께가 50  $\mu\text{m}$ 이고, 지름이 500  $\mu\text{m}$ 인 원기둥을 삼각 격자 구조로 쌓고 적당한 온도에서 열처리를 하여 제작하였다. [그림 16](a)는 제작된 광결정 섬유의 CCD사진이다. 광결정 섬유의 이론적인 계산은 full vector model를 이용하여 평면파 확장 방법

(plane wave expansion method)과 Hermite gaussian 방법을 사용하여 전산모사하였다. [그림 16](b)는 1 THz에서 평면파 확장(plane wave expansion) 방법을 사용하여 계산한 모드 분포이다.

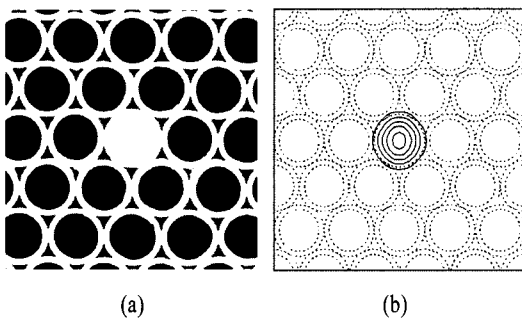
[그림 17]은 광결정 섬유를 통과한 신호를 측정된 실험 결과이다. 주파수 대역에서의 분석 결과 0.4 THz에서 군속도 분산이 2 ps/THz/cm이고, 낮은 주파수 영역에서 positive chirp이 발생하는 것을 알 수 있다. 0.2 THz 이하에서 신호가 급격히 작아지는 이유는 모드의 면적이 넓어져 결합 효율이 급격히 감소하기 때문이다. 이 실험의 경우 광 결정 섬유 길이가 짧아 정확한 손실 측정이 불가능하였으나, HDPE가

가진 물질 손실이 매우 작으므로 실제 광결정 섬유의 손실은 위의 측정치보다 훨씬 작을 것으로 판단된다. 이러한 THz 플라스틱 광결정 섬유는 기존의 유전체 THz 도파로 보다 손실이 작을 뿐만 아니라 기존의 광통신에서 사용되던 기능성 광섬유와 같이, 분산 보정(dispersion compensation)이나 분극 조절(polarization control) 기능을 가진 연결 도파로 혹은 단일 THz 부품으로서의 응용 가능성이 매우 높다고 하겠다.

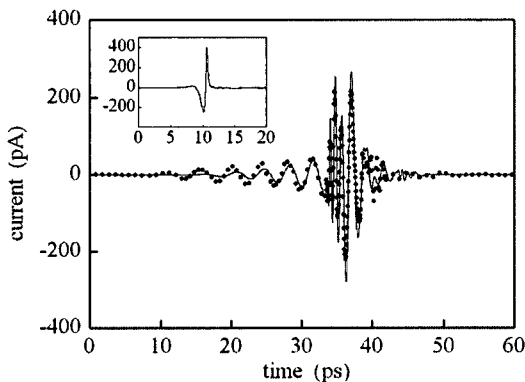
#### IV. 결 론

본 논문에서는 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 THz 펄스 기술을 이해하고 응용하기 위하여 기초적이면서 동시에 중요한 소자 및 측정 기술에 대하여 THz 펄스 발생 및 측정, 그리고 THz 도파로를 중심으로 간략히 살펴보았다. 그 외에 현재의 수준을 뛰어넘는 요소 기술에 대한 중요한 연구들이 세계 곳곳의 일부 연구실들에서 진행되고 있으나, 아직 완성된 단계가 아니거나, 방대한 다학제적 배경지식을 필요로 하는 관계로 본 논문에는 포함하지 않았다. THz 펄스 기술과 직접적으로 연관된 나노, 바이오 기술 등 많은 THz 응용 기술들이 있으나, 이 또한 본 특집호의 다른 논문에서 기술하고 있기에 본 논문에서는 포함하지 않았다.

미국과 유럽에서는 이미 70년대 말부터 THz 연구가 시작되어 현재는 일본, 중국과 함께 정부 차원의 집중적인 투자가 이루어지고 있고, 나노 기술, 바이오 기술과 더불어 이미 많은 기업들이 특허권 확보와 실용화 기술을 선도하고 있다. 특히 미국의 경우 이미 2004년에 MIT's Magazine of Innovation에서 THz 기술을 미국의 10대 유망 기술의 하나로 선정하였고, 일본의 경우에도 2005년에 문부과학성에서 발간한 "제 3기(2006-2010) 과학기술 기본계획"에 THz 기술을 일본의 10대 기간 기술 중의 하나로 선정한 바 있



[그림 16] (a) 제작된 광결정 섬유, (b) 계산된 광결정 섬유의 기본 모드<sup>[10]</sup>



[그림 17] 측정된 신호(점선)와 계산된 신호(실선), 삽입된 그림은 입력 신호<sup>[10]</sup>

다. 그동안 국내에서는 90년대 중반 이후 학계 위주로 THz 포토닉스에 대한 비교적 소규모의 연구가 진행되어 왔으나, 최근 수년간 대부분의 정부 출연 연구소에서도 THz 연구가 시작된 상황이다. 아직 해외 주요 선진국에 비하면 양적인 면에서 절대적으로 열세에 놓여 있으나 질적으로는 매우 높은 수준의 연구가 진행되고 있어서 적절한 투자와 지원이 이루어진다면 좋은 성과가 기대되는 상황이다. 특히, THz surface plasmon, THz 근접장 현미경(THz NFM), THz 파를 이용한 나노 물질 분석, THz 도파로 등의 분야에서는 이미 세계 최고 수준의 연구가 진행되고 있다고 할 수 있다. 따라서 국내에서도 더 이상 늦기 전에 전략적 차원에서 THz 기술에 대한 연구의 활성화가 체계적으로 시작되어야 할 시점이라고 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y. J. Ding, Wei Shi, "From backward THz difference-frequency generation to parametric oscillation", *IEEE J. Select. Topic. in Quant. Elec.*, vol. 12, pp. 352-359, 2006.
- [2] Nan Ei Yu, Changsoo Jung, Chul-Sik Kee, Yeung Lak Lee, Bong-Ahn Yu, Do-Kyeong Ko, and Jongmin Lee, "Backward terahertz generation in periodically poled lithium niobate crystal via Difference Frequency Generation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 1501-1504, 2007.
- [3] N. E. Yu, C. Kang, H. K. Yoo, C. Jung, Y. L. Lee, C.-S. Kee, D.-K. Ko, J. Lee, K. Kitamura, and S. Takekawa, "Simultaneous forward and backward terahertz generations in periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub> crystal using femtosecond pulses", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, pp. 041104-041106, 2008.
- [4] N. E. Yu, C. Jung, C-S. Kee, Y. L. Lee, W-J Lee, J-E. Kim, and H. Y. Park, "Terahertz generation in quasi-phase-matching structures using femtosecond laser pulses", *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 51, pp. 493-497, 2007.
- [5] Y. S. Jin, S. G. Jeon, G. J. Kim, J. I. Kim, and C. H. Shon, "Fast scanning of a pulsed terahertz signal using an oscillating optical delay line", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 78, pp. 23101-023105, 2007.
- [6] G. J. Kim, S. G. Jeon, J. I. Kim, and Y. S. Jin, "Terahertz pulse detection using rotary optical delay line", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 7332-7335, 2007.
- [7] R. Mendis, D. Grischkowsky, "Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulse", *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 846-848, 2001.
- [8] T.-I. Jeon, J. Zhang, and D. Grischkowsky, "THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, 161904-161906, 2005.
- [9] Y. B. Ji, E. S. Lee, J. S. Jang, and T. -I. Jeon, "Enhancement of the detection of THz Sommerfeld wave using a conical wire waveguide", *Opt. Express*, vol. 16, pp. 271-278, 2008.
- [10] H. Han, H. Park, M. Cho, and J. Kim, "Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 15, pp. 2634-2636, 2002.
- [11] M. Cho, J. Kim, H. Park, Y. Han, K. Moon, E. Jung and H. Han, "Highly birefringent terahertz polarization maintaining plastic photonic crystal fibers", *Opt. Express*, vol. 16, no. 1, pp. 7-12, 2008.

≡ 필자소개 ≡

한 해 옥



1986년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1988년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1995년: 일리노이대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)  
 1995년~1997년: AT&T Bell Labs 연구원  
 1998년~2001년: 과학기술부 창의연구단,

Center for THz Photonics, 연구단장

1997년~현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] THz 포토닉스, 나노포토닉스, 광결정 및 메타물질, 반도체 레이저

유 난 이



1994년: 동의대학교 물리학과 (이학사)  
 1998년: 동의대학교 물리학과 (이학석사)  
 2002년: 부산대학교 물리학과 (이학박사)  
 2002년~2005년: 국립물질과학연구소 박사후 연구원 (일본 NIMS, 츠쿠바)  
 2005년~현재: 광주과학기술원 고등광기술연구소 선임연구원

[주 관심분야] 비선형 파장변환, THz 광원개발, 준위상정합소자 제작 및 분석

전 태 인



1988년: 동아대학교 물리학과 (공학사)  
 1990년: 동아대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1997년: 오클라호마 주립대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)  
 2004년~2005년: 오클라호마 주립대학교 방문교수

1998년~현재: 한국해양대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] THz 시영역 분광기술, THz 도파로

진 윤 식



1986년: 서울대학교 원자핵공학과 (공학사)  
 1990년: 서울대학교 원자핵공학과 (공학석사)  
 1999년: 나가사키대학 전기전자공학과 (공학박사)  
 1990년~현재: 한국전기연구원 책임연구원

구원

[주 관심분야] 테라헤르츠파 발생 및 응용, 펄스파워-플라즈마 발생 및 응용



박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)

1989년: 일리노이대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)

1994년: 일리노이대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

1994년~1996년: LG전자기술원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 및 테라헤르츠파 수동소자 (안테나 포함) 설계 및 해석

김 정 희

현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부

문 기 원

현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정

한 연 호

현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부

정 은 아

현재: 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부

강 철

현재: 광주과학기술원 고등광기술연구소

이 영 락

현재: 광주과학기술원 고등광기술연구소

고 도 경

현재: 광주과학기술원 고등광기술연구소

지 영 빈

현재: 아주대학교 전자공학부

이 의 수

현재: 한국해양대학교 전기전자공학부

김 근 주

현재: 한국전기연구원 융합기술연구단

한 경 호

현재: 아주대학교 전자공학부