

# 테라헤르츠파와 응용기술

▣ 진윤식 / 한국전기연구원 책임연구원

## 머리말

테라헤르츠파(1 THz =  $10^{12}$  Hz) 기술은 0.1-10 THz 주파수 범위의 전자기파를 이용하는 기술을 지칭하며 이 분야의 기술은 1990년대 중반부터 본격적으로 연구되기 시작한 신생기술의 하나이다. THz 파는 마이크로파와 적외선 사이에 놓여 있어 기존의 전파와 광 영역 사이에 위치하는데, 일반적으로 사용되는 전자기술과 광학기술로는 접근하기 어려워 전자기 스펙트럼 중 가장 접근하기 어려운 영역("THz Gap" 이라고도 불림)의 하나로 알려져 있다. 최근 십수 년간 재료기술의 발전과 초미세 공정기술의 발달로 말미암아 새로운 고효율 테라헤르츠 소스가 등장하였다. 특히 소형 저가격의 펄스 레이저의 상용화로 극초단, 고휘도의 THz 파 발생기술이 가속화 되었다. 이로 말미암아 테라헤르츠 시스템에 일대 혁명이 일어났고 고도의 과학기술 연구와 상용 시스템 개발을 위한 테라헤르츠 기술의 가능성이 증명되었다. 테라헤르츠 기술은 의료, 바이오, 보안, 국방, 환경, 우주 및 통신 등과 같은 다양한 고부가가치 서비스 및 첨단 산업 부문에서 관심을 갖고 있을 만큼 매력적인 연구 분야로 성장하고 있다. 따라서 향후 5-10년 이내에 테라헤르츠 시스템의 기술 수준과 상용화 가능성이 크게 확장될 것으로 전망된다. 이와 같은 전망은 미국의 MIT대학 발행의 Review 지가 2004년 2월, 경제와 인간의 삶에 큰 영

향을 미치는 10대 기술로서 테라헤르츠 기술을 6번째로 선정한 사실과 2005년 1월초 일본정부가 일본의 미래 10대 근간기술로서 테라헤르츠 기술을 첫 번째로 선정한 것 등이 뒷받침해준다

본고에서는 THz 파의 발생과 계측, 주요 응용분야에 대해서 개괄하고 국내외의 연구동향과 향후 발전 전망에 대해서 기술하고자 한다.

## 테라헤르츠파 발생기술

테라헤르츠 소스는 테라헤르츠 기술의 발전에 있어서 가장 일차적으로 확보되어야 하는 가장 기본적인 핵심소자이다. 현재까지 THz 파를 발생시키는 방법은 여러 가지가 제안되었지만 크게 펄스 형태와 THz 파를 발생시키는 방법과 연속파(CW) 형태의 THz 파를 발생시키는 방법으로 나눌 수 있다.

### 〈펄스형 테라헤르츠파의 발생〉

펄스형 THz 파의 발생하는 대표적인 방법으로는 광전도 안테나법 (Photoconductive Antenna: PCA), 광정류법 (Optical Rectification: OR) 그리고 반도체 표면 전계 (Surface-Field of Semiconductor)를 들 수 있다. 주로 물질의 비선형성을 이용한 방법인데 수 THz 영역까지 포함하는 아주 넓은 대역폭 (bandwidth)을 갖고 있어서 시영역 분광법을 이용한 물질의 기본 특성 연구에 유용하다. 일반적으로 펄

스 형태의 THz 파 발생은 펨토초 레이저와 그 외 각종 광학 소자 및 장비를 사용하여 구현되는데 전체적으로 복잡한 장치를 구성하고 있다. 아래 그림 1에 대표적 펄스형 THz파의 발생법에 대한 개념도를 보인다.

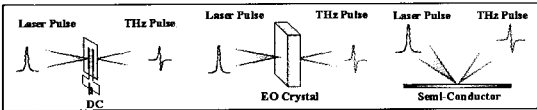


그림 1 펄스형 THz 발생기술 (a) 광전도 안테나법, (b)광정류법, (c) 반도체 표면전계를 이용

광전도 안테나법에서는 LT-GaAs와 같은 반도체 표면에 금속의 안테나 전극을 형성하고, 전극 양단에 바이어스 전압을 인가한 상태에서 펨토초의 레이저를 전극사이에 조사한다. 레이저 광에 의해 여기된 전자와 정공이 반도체 표면에서 바이어스된 전극으로 이동하면서 빠른 썬지 전류가 흐르고 이 전류의 시간미분에 비례하는 전자기파(THz 파)를 방사한다. 이 방법은 다른 THz 펄스 발생법과 비교할 때 비교적 큰 출력을 얻을 수 있으며 레이저 출력과 바이어스 전압을 조절함으로써 출력 가변이 용이한 반면 발생하는 THz파의 주파수 영역은 반도체의 특성과 안테나의 구조에 의해 비교적 저주파 영역으로 제한되는 특징이 있다. 그림 2는 펄스폭 100 fs, 파장

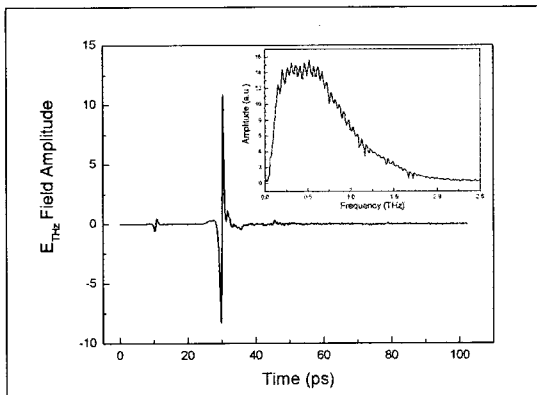


그림 2 광전도법에 의한 THz 파 파형과 스펙트럼(바이어스 전계 5kV/cm)

800nm의 Ti:Sapphire 레이저를 LT-GaAs 기판상에 형성된 반도체 표면에 조사하여 얻은 THz파의 펄스 형상과 주파수 스펙트럼을 보여주고 있다.

광정류(Optical Rectification)는 영이 아닌 2차 투자율 계수( $\chi^{(2)}$ )를 가지는 물질에서 발생하는 2차 비선형효과로서, 1962년 Ward 등에 의해 발견된 이후 피코초, 펨토초 레이저의 개발과 더불어 THz 파의 발생에도 널리 이용되게 되었다. 극초단의 레이저 펄스가 광학결정에 조사되면 결정내에 순시 편극(transient polarization)  $P(t)$ 을 유기하고 이 순시 편극의 2차 시간 미분에 비례하는 전자기파(THz 파)를 방사한다. GaAs, LiTaO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, DAST, ZnTe 등의 결정에서 광정류에 의한 THz파의 발전이 확인되었으며, 최근에는 화학적 안정성과 THz빔과 원적외 펄프빔의 균속도 정합성 등에서 우수한 특성을 보이는 ZnTe 결정이 가장 널리 이용되고 있다. 광정류에 의한 THz 발생법은 광전도 안테나법에 비해 THz파의 출력은 작으나 구조적으로 간단하고 동작 주파수 범위가 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. 아래 그림 3에 1 mm 두께의 ZnTe (110) 결정에 상기의 레이저를 조사하여 얻은 THz파의 파형과 스펙트럼의 예를 보여준다.

바이어스를 인가하지 않은 순수한 반도체 표면에 레이저를 조사하였을 때 THz파가 발생하는 현상이 1990년 Zhang 등에 의해 관찰되었다. 특정한 반도체

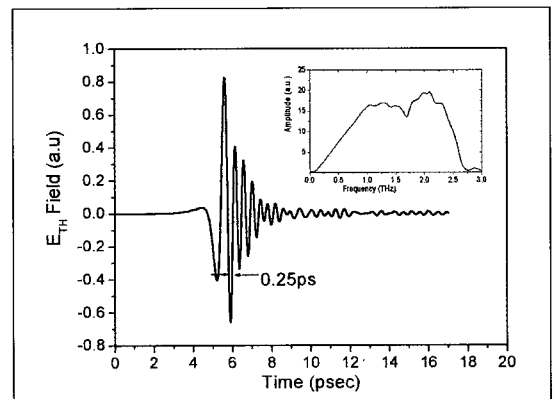


그림 3 정류법에 의해 얻어진 THz파 펄스 파형과 스펙트럼

체 표면에서 THz파가 방사되는 원리에는 여러 가지 효과로서 설명되었으나 반도체에 고유하게 존재하는 표면전계(intrinsic surface depletion field)와 전자와 정공의 확산속도의 차이(photo-Dember 효과)에 의해 생성되는 쌍극자 의한 THz 방사 해석이 가장 유력해 보인다. 즉 초고속 레이저 조사에 의해 반도체 표면에 생성된 하전입자는 반도체 표면과 수직으로 내재하는 강한 전계( $\sim 10^6$  V/cm)에 의해 순간적으로 가속되고 이 때 흐르는 순시전류에 의해 THz 영역의 전자파가 발생할 수 있다. 또한 레이저 조사에 의해 발생된 전자와 정공이 반도체 표면에서 내부로 확산되는 과정에서 두 하전입자의 이동도 차이에 의해 하전입자의 분리가 일어나고 이때 생성되는 전자-정공의 쌍극자가 형성되어 THz파 방사될 수 있다. 바이어스 되지 않은 반도체 표면으로부터의 THz 방사는 발생시키는 구조가 매우 간단하며 광정류법에 비해 큰 THz파 출력을 얻을 수 있으며, 광전도안테나법 보다는 넓은 스펙트럼을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 4에 p-InAs(100) 반도체 표면에 상기의 레이저를 조사하였을 때 얻어지는 파형과 스펙트럼을 보인다.

〈연속형 테라헤르츠파의 발생〉

펄스형 THz 파는 서브 피코초의 펄스폭을 가지기 때문에 주파수 영역에서 수 THz의 광대역 스펙트럼

을 가지는데 반하여, 연속형(CW) THz파는 펄스폭 개념이 들어가지 않으므로 일반적으로 단일 주파수를 중심으로한 협대역 스펙트럼을 가진다. 레이저를 이용하여 연속형의 THz 파를 발생시키는 가장 일반적인 방법은 THz파를 발생시키기 위한 포토믹서(Photomixer)와 이를 자유공간으로 방출할 수 있는 안테나를 일체화하는 것이다. 이 방법은 주파수 가변성과 효율이 좋고 반도체 칩 크기로 제작이 가능하다는 장점이 있다. 이외에도 레이저를 이용하는 장치들로서 DFG (Difference Frequency Generation), TPO (Terahertz Parametric Oscillator), 주파수 체배기를 이용한 CW 테라헤르츠 소스도 연구 중이다. 특히 테라헤르츠 레이저라고 할 수 있는 핫홀 (Hot Hole) 레이저, 양자 캐스케이드 레이저 (Quantum Cascade LASER: QCL) 또는 자유전자 레이저 (FEL) 등이 이미 개발되어 있는데 출력이 크고 파장 조절도 비교적 자유롭다. 하지만 핫홀레이저, QCL 등은 초저온 냉각을 필요로 하고, 초고난도의 반도체 공정을 통하여 제작하여야 하는 난점이 있으며, FEL은 구조가 거대하고 복잡한 장비의 조합으로 이루어져 있는 단점이 있다. 한편 각종 고체 소자를 이용하여 마이크로파 영역의 전자파를 발생시키는 장치를 통하여 주파수를 THz 영역까지 높여려는 연구도 진행 중이다. 각종 반도체 (GaAs, InP, CdTe 등)를 이용 0.1THz 에서 수십 mW이상의 전자파를 발진하는 다이오드를 만들 수 있다. 이 반도체 다이오드는 최대 효율을 보이는 주파수가 1~20GHz로 0.2THz 이상에서는 거의 발진이 되지 않는다. 역시 반도체를 이용한 주파수 증폭기를 이용해 1THz 이상의 발진 소스를 만들 수가 있다.

또한 진공 전자 디바이스를 이용한 CW THz 파 발진 기술도 활발히 연구되고 있다. 초소형 THz 진공전자 디바이스로는 BWO가 있는데 세계에서 유일하게 러시아의 ISTOK이란 회사에서 생산하고 있다. 출력은 0.1THz - 1.5THz에서 100mW-1mW가 나온다. 반도체를 사용하는 고체 디바이스에 비해서 고출력 고효율이지만 전원공급기가 고체 디바이스에 비해서 몇 배 이상 크고 무겁다. 미국의 CCR에서 재

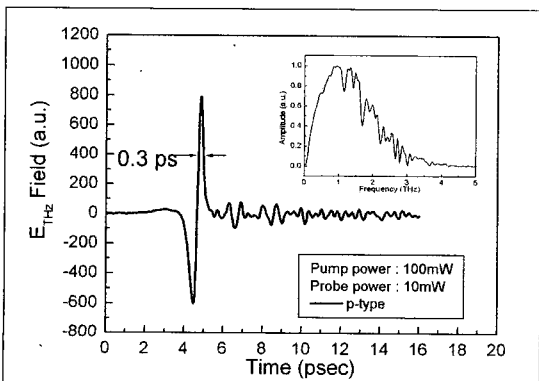


그림 4 바이어스 되지 않은 p-InAs(100) 표면으로부터의 THz파 파형과 스펙트럼

래식 가공기법 대신 MEMS 기술의 하나인 X-ray LIGA를 이용한 BWO를 개발 중이다.

## THz 파 측정기술

THz 파를 측정하는 방법에는 광전도 안테나, 전광 (electro-optic, EO) 샘플링, 볼로미터, 쇼트키 장벽 다이오드 그리고 SIS (superconductor - insulator - superconductor) 믹서 등을 사용하는 방법이 있다. 이러한 측정방법들은 측정 감도와 대역폭에 있어서 각각 장단점을 갖고 있다. 예를 들어 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 광전도 안테나와 전광 샘플링의 경우를 비교해 보면 (그림 5 참조), 광전도 안테나를 사용하는 것이 전광 샘플링을 이용하는 것보다 측정된 신호의 크기가 훨씬 큰 장점이 있지만, 측정 가능한 주파수 대역폭이 안테나의 응답특성에 의해서 제한되고 레이저 빔을 정렬하는데 많은 노력을 들여야 하는 단점이 있다. 광전도 안테나 및 전광 샘플링을 이용해서 측정하는 방법은 신호의 상대적인 크기와 위상을 모두 측정할 수 있지만, 신호의 절대 출력을 측정하기 위해서는 볼로미터를 사용해야 한다. 즉, 원하는 측정 결과를 얻기 위해서는 각각의 측정방법의 특성과 장단점을 잘 이해하고 실험목적에 알맞은 방법을 사용해야 한다.

## 테라헤르츠파 분광기술 - 시영역 분광법 (THz-TDS)

펄스 THz 파를 발생시켜 시험하고자 하는 샘플을 향해 입사시키면, 그 펄스는 샘플에서 일부는 반사되고 일부는 투과하는 과정을 거친다. 이때 사용되

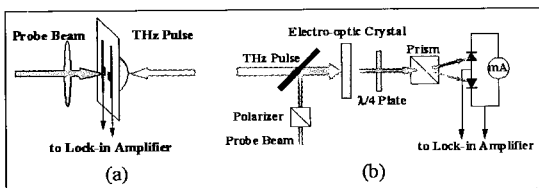


그림 5 THz 측정기술 (a) 광전도 안테나법, (b) 전광 샘플링

는 펄스는 보통 1 ps 이하의 펄스폭을 가지며 이는 중심 주파수가 0.5 ~ 1 THz 정도이며 0.1 THz에서 3 ~ 5 THz 까지의 광대역 스펙트럼에 해당된다. 투과 또는 반사된 테라헤르츠 신호는 원래의 입사된 테라헤르츠 신호와 달리 전기장 세기가 시간적으로 변화하며, 시간적 위상 지연이 생기게 된다. 이러한 변화를 측정하여 물질의 특성을 분석하는 기술이 THz 파 시영역 분광법(THz time-domain spectroscopy; THz-TDS)이다. 시간 영역에서 측정된 데이터를 주파수 영역으로 변화시키기 위하여 푸리에 변환을 함으로써 각 주파수 성분의 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 모두 알 수 있다. 주파수 영역의 진폭과 위상 성분을 이용하여 물질의 굴절률과 흡수율을 간단히 계산해 낼 수 있다.

### • 간단한 계산 원리

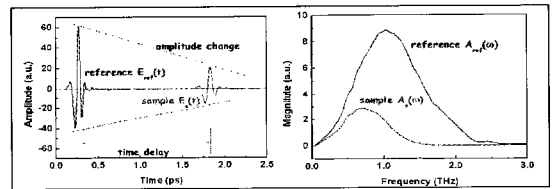


그림 6 기준파와 시료를 투과한 파의 시간영역 파형 및 주파수 영역 스펙트럼

- 측정된 테라헤르츠 펄스의 기준파와 샘플을 통과한 시간영역의 진폭을 각각  $E_{ref}(t)$ ,  $E_s(t)$ 라 하고, 후리에 변환을 통해서 얻어진 주파수 영역의 스펙트럼을  $A_{ref}(w)$ ,  $A_s(w)$ 라 하면

$$\tilde{A}_{ref}(w) = FFT[E_{ref}(t)] = A_{ref}(w) e^{-j\varphi_{ref}(w)}$$

$$\tilde{A}_s(w) = FFT[E_s(t)] = A_s(w) e^{-j\varphi_s(w)}$$

$$\frac{\tilde{A}_s(w)}{\tilde{A}_{ref}(w)} = \rho(w) e^{j\Delta\phi(w)}$$

의 관계로부터, 다음식으로 굴절률과 흡수율을 구할 수 있다.

$$n_s = \frac{\Delta\phi(w) \cdot c_0}{\omega \cdot d} + 1$$

흡수율  $\alpha_s(\omega) = \frac{2}{d} \cdot \ln \left[ \frac{1}{\rho(\omega)} \right]$

d: 샘플의 두께,  $c_0$ : 빛의 속도

### THz 파 영상기술

< Display Mode >

물질에 투과 또는 반사된 THz 파를 이용하여 물질의 상(image)을 얻기 위하여 THz 파에 포함된 다양한 정보를 이용한다. 많은 정보 가운데 대상 물질의 특성을 가장 잘 표현할 수 있는 변수를 선택하여 영상화하는 기술이 중요하다. 시간영역에서 얻어진 THz 파형으로부터 진폭의 변화, 어떤 피크가 나타나는 시간의 변화 그리고 일정한 시간 영역의 파형 적분값 등이 이미지를 형성하기 위한 변수로 이용될 수 있다. 주파수 영역의 스펙트럼으로부터 특정 주파수의 진폭변화, 스펙트럼 폭 그리고 일정 주파수 구간에서의 스펙트럼 적분값 등이 영상 구성을 위한 변수로 이용될 수 있다. 아래 그림에 이미지를 형성하기 위한 변수의 예를 보인다.

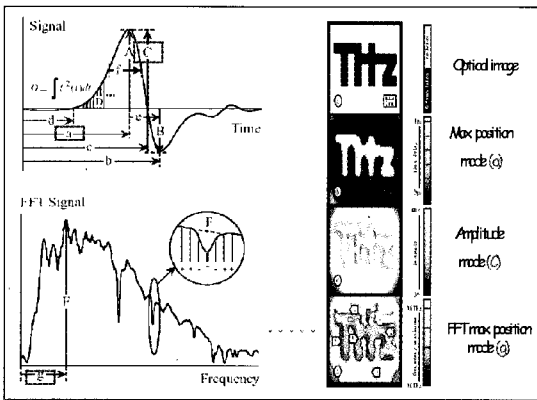


그림 7 이미지 형성을 위한 파라메타 설정 예

< 주사형 영상법(Scanning Imaging) >

테라헤르츠 시간영역 분광법은 그 자체로 물질의 물성을 파악하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 이것을 더욱 더 발전시켜 테라헤르츠 영상을 얻기 위한 방법이 개발되어 여러 가지 응용분야에 현재 쓰이고

있는데, 시료를 THz 파 광로 상에 수직으로 주사시킴으로서 투과된 THz 파의 특성 변화를 이용하여 2차원의 이미지를 얻을 수 있다. 이 방법은 한번에 한 점만 측정할 수 있어서 영상을 만들기 위해서는 샘플의 전체 면적을 여러 개의 픽셀로 나누어 각 픽셀마다 측정해야 한다. 따라서 충분한 해상도의 영상을 얻기 위해서는 그만큼 픽셀의 수가 많아야 하므로 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점이 있다. 최근에 이러한 단점을 보완하기 위한 고속 주사법 (fast scanning)이 개발되어 상업화된 시스템에 적용되고 있다. 아래 그림에서 영상을 얻고자하는 물체를 테라헤르츠 빔이 집속되는 위치에 놓고 이차원적으로 주사하면서 투과된 테라헤르츠 빔을 측정하는데 영상의 해상도는 집속된 빔의 크기 및 주사시의 이동 정밀도에 의존한다.

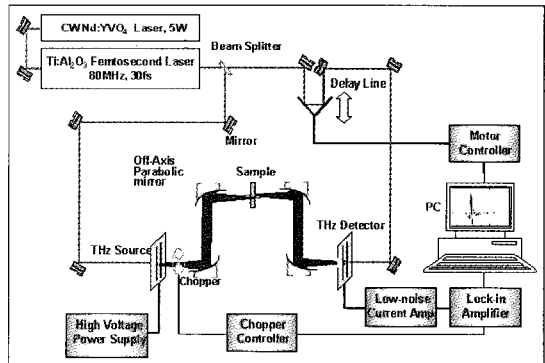


그림 8 주사형 테라헤르츠 영상 시스템 구성도

< 2차원 실시간 영상법 >

주사형 테라헤르츠 영상 시스템의 단점을 보완하기 위해 실시간으로 영상을 보기 위한 방법이 개발되었다. 이것은 미국 RPI 대학의 Zhang 그룹에서 처음 고안한 방법으로 주사형 테라헤르츠 영상 방법의 결점을 보완하여 실시간으로 영상을 볼 수 있도록 CCD 카메라를 이용한다. 강력한 THz 파를 발생시켜 넓은 면적의 시료에 THz 파를 투과시킨 후 같은 크기로 확장된 검출레이저를 동시에 비선형 광학결정(보통 ZnTe 결정이 이용됨)에 조사하여 광학결정에서 일어나는 검출빔의 편광변화를 편광자와 CCD

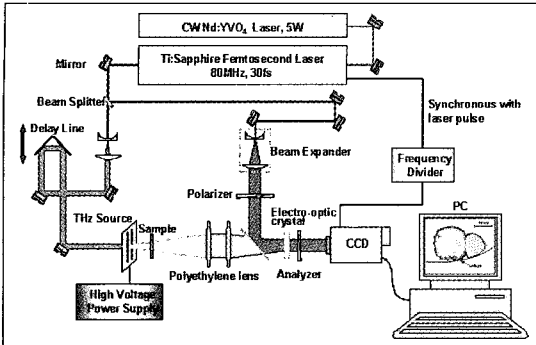


그림 9 2채원 실시간 영상장치 구성도

카메라를 이용하여 검출한다. 이 방법에서는 우선 강력한 테라헤르츠 빔을 만들기 위해서 고효율의 펄스 레이저 증폭기가 필요하게 된다. 또한 레이저 빔을 확장하고, 테라헤르츠 빔과 평행하게 넣기 위한 복잡한 광학장치들과 대형의 비선형 광학결정과 CCD 카메라 등이 필요하게 되어 전반적인 시스템이 고가로 된다.

### 〈연속파 테라헤르츠 영상법〉

상기의 영상기법들은 주로 펄스형의 THz 파를 이용하는 방법이나 본질적으로 출력이 약하여 두껍거나 큰 물체에 대해서는 투과 또는 반사하는 THz 파의 강도가 약하기 때문에 많은 제약이 따른다. 비교적 고효율의 연속파 테라헤르츠 소스를 이용하면 이러한 문제점은 다소 해결되나 아직 테라헤르츠대의 고효율 발생원은 자유전자 레이저를 제외하고는 기술 개발이 미진한 상태이다. 그 대신에 수백 GHz대의 밀리미터파 영역의 연속파 발생장치를 이용하여

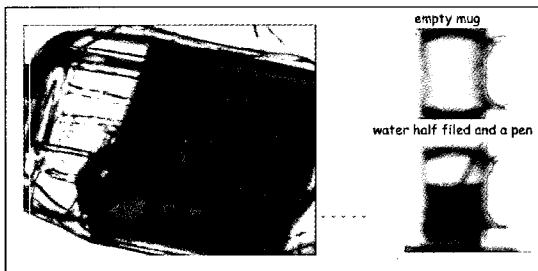


그림 10 테라헤르츠 CW 영상(RPI, X. -C. Zhang 제공)

이미징을 얻는 연구가 활발히 진행 중이다. 아래 그림은 200 GHz대의 전자기파를 발생시키기 위한 Gunn diode 시스템을 이용한 CW 영상 예를 보인다. 이러한 연속파 소스를 이용한 영상시스템은 특히 보안, 국방 등에의 응용이 기대되는 분야이다.

## 테라헤르츠파 응용기술

### 〈THz파 생체 의료 진단기술〉

100 GHz에서 10THz에 이르는 THz 파는 새로운 의료영상 방식으로서 유망하다. 최근 펄스 또는 연속파 테라헤르츠 소스를 이용한 다양한 영상 시스템이 보고 되고 있다. THz 파는 수분에 의해 강하게 흡수되나 조직(組織)내의 수분의 양, 구성, 화학적 내용물의 차이에 의해 영상 이미지의 대비(contrast)가 나타나게 된다. 치아, 피부, 흉부 그리고 고체 기관(器官)에 대한 초기 연구결과들은 다른 영상 기법으로는 분명하지 않았던 특징들을 밝혀낼 수 있다는 것을 시사하였다. TeraView 사에서 제공한 basal cell carcinoma (BCC) 진단에 관한 아래의 그림은 진단도구로서의 테라헤르츠 기술의 잠재력을 보여준다. THz파 분광 기술을 이용한 DNA 와 단백질체에 대한 분석 응용과 신약 개발, 식품산업 등에 대한 응용 범위도 점차 확대되고 있다.

### 〈국방 및 보안기술〉

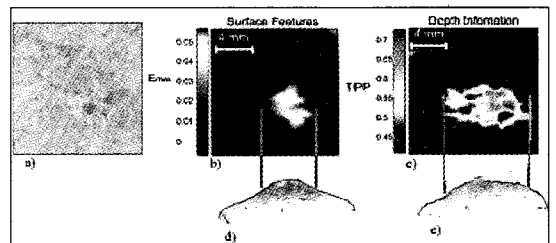


그림 11 마디모양의 BCC에 대한 비침습 in vivo 측정 a)상해부위의 임상사진, b)Emin 에서의 THz 값을 그려서 형성한 THz 영상으로 표면의 특징을 보여준다, c)깊이 250um에서의 중앙의 범위를 보여주는 THz 이미지, d)심한 염증을 가진 외피를 보이는 THz 영상 b)에 해당하는 조직절개 모습 e)중앙의 측면 범위를 보이는 THz 영상 c)에 해당하는 조직절개 모습. TeraView Ltd. Cambridge, UK

테라헤르츠 기술은 영상과 분광 기술을 결합하여 차세대 보안검색과 국방 기술에 다양한 응용분야를 제공한다. THz 파를 이용하면 옷이나 종이 속에 숨긴 무기나 유해 장치를 탐지할 수 있다. 기존의 X선 영상 탐지 기술은 비금속 물체의 탐지가 상당히 곤란할 뿐만 아니라 인체 유해성 때문에 사람을 대상으로 하는 일상적인 보안 검색에는 부적합하다. 이에 반해 THz 파는 보통의 옷감과 종이를 쉽게 통과해서 그 안에 들어있는 물체를 금속이든 비금속이든 관계없이 선명한 영상으로 보여줄 수 있으며, 검출용 광이 작은 에너지의 원적외선 영역이므로 인체에 대한 유해성의 염려도 없다. 테라헤르츠 기술은 영상기술을 통하여 물질의 존재 여부 뿐만 아니라 의심스러운 물체에 대한 분광 정보(일종의 지문-finger print)까지 제공해줄 수 있어 그 물체의 화학 조성까지 결정할 수 있다. 이러한 특성 때문에 폭약이나 지뢰의 탐지, 그 밖의 금지된 화학 물질의 검색 수단으로도 사용될 가망성이 매우 높다. 그림 12는 한국전기연구원에서 실시한 화포용 추진제 화약에 대한 분광 실험 결과를 보여주고 있다. JA2 와 LOVA라는 두 가지 화약 종류에 대한 특이한 스펙트럼으로부터 이들 폭발물류에 대한 구분이 가능함을 보여주고 있다.

〈통신 및 정보 기술〉

테라헤르츠 통신은 오래전에 제안되었지만, THz

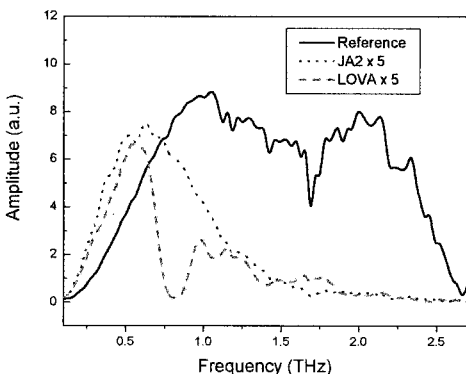


그림 12 화포추진제에 대한 분광특성

파가 대기에 잘 흡수되기 때문에 레이더와 통신 응용으로 이용되기에는 심각한 제약을 받는다. 그럼에도 불구하고 몇몇 근거리 시스템용으로 테라헤르츠 통신이 연구되었다. 이러한 연구에는 THz 파의 대기 흡수성을 이용하여 목표 수신 지역 밖에서는 THz 파 감쇠가 심하여 통신이 불가능하고 목표 수신 지역 안에서만 통신이 가능한 테라헤르츠 보안 통신이 있다. 또한 테라헤르츠 통신을 위성 간 보안 시스템에 적용하면, 지향성이 매우 높은 테라헤르츠 빔을 만드는데 필요한 안테나 크기가 작아질 뿐만 아니라 테라헤르츠 반송파가 갖는 넓은 주파수대에서 이익을 얻는다.

탄소 나노튜브는 전도도가 매우 크기 때문에 일반 금속이나 반도체와는 달리 단순히 홀 측정에 의해서는 물성을 측정하기가 힘들다. 또한 기존에 이루어진 측정도 낮은 주파수 영역에서나 적외선 영역에서 이루어져 있어서 테라헤르츠 주파수 영역에서 크게 변하는 분산이나 흡수도 등의 특성을 파악하는데 문제가 있었다. 테라헤르츠 시영역 분광 기술을 이용하면 주파수 영역에서 나노튜브의 물성을 파악하는데 큰 도움이 될 수 있다. 또한 테라헤르츠 기술은 앞으로 테라 비트급으로 동작속도가 향상되리라 전망되는 초고속 나노 소자의 동작 특성 분석에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

현재 테라헤르츠 기술의 정보기술 분야의 응용에는 반도체 산업에서 반도체를 검사할 때 지금까지 기술로는 할 수 없었던 비파괴 검사를 들 수 있다. 기존의 반도체 검사는 탐침을 검사하고자 하는 반도체의 표면에 직접 접촉시킨 상태에서 측정된 전류값으로 캐리어 농도나 수명을 구한다. 하지만 이 방법으로는 반도체 전체 표면의 균일성은 측정하는 데는 한계를 가질 수밖에 없다. 이외의 기존 방법은 대부분 특별한 가공 공정을 요하기 때문에 비파괴 검사 방식으로 볼 수 없다.

이에 반하여 THz 파는 특성상 시간영역 분광법을 이용하면 반도체의 굴절률이나 흡수계수를 비교적 간단하게 비파괴적인 방법으로 측정할 수 있다. 또한 도핑농도라든가 캐리어 이동도(mobility)등도 반

도체의 테라헤르츠 투과계수가 주파수에 따라 변하므로 Drude 이론을 적용하면 기존의 장비보다 더 간단하면서도 정확한 측정이 가능하고 공간적인 분포까지도 측정할 수 있다고 보고 되고 있다.

또한 THz 파는 물이나 금속 등을 제외한 대부분의 물질을 투과하는 성질이 있는데, 그 중 플라스틱이나 세라믹 같은 물질의 경우 투과율이 높은 편이다. 따라서 이런 특성을 이용하면 전술된 테라헤르츠 영상기술을 사용하여 반도체 칩 내부 단락 검사를 할 수 있게 된다. 이와 같은 테라헤르츠 영상기술은 현재의 기술 수준에서도 반도체 칩의 대량생산 라인에서 불량품 추출 등에 직접 응용이 가능한 것으로 판단된다.

## 〈환경 및 우주 기술〉

테라헤르츠 기술은 대기를 측정하고 분석하는 데에 많은 가능성을 보여주고 있다. 많은 분자나 화합물들은 테라헤르츠 영역에서 이 THz 파를 흡수하거나 반사한다. 특히 기체상태의 분자나 화합물들은 테라헤르츠 영역에서 THz 파를 강하게 흡수하는 성질이 있으므로 스펙트럼 상에서 흡수 스펙트럼 선으로 나타난다. 따라서 이 스펙트럼을 분석하면 어떤 물질인지 특성지을 수 있고 분별해낼 수 있다. 이런 성질 때문에 THz 파는 대기 중 다이옥신 같은 오염물질 검출이나 대기 성분 검사 등에 유용하다. 이외에도 우리 생활 주변에서 건강에 심각한 장애를 유발하는 발암물질의 검출에도 테라헤르츠 분광기술을 이용하려는 연구도 보고 되고 있다.

THz 파를 이용한 관측기술은 전자기파를 이용하는 천문학 분야에서 있어서 오랜 역사를 가지고 있으며 아직도 활발히 연구가 진행 중인 분야이다. 기존의 천체 관측기술(기구천문학 외)은 대기 중의 수분이나 다른 성분들에 의해서 방해받지 않고 천체를 관측하는 것은 우주 공간에 관측 장비를 설치해야만 가능하다. THz 파(또는 서브밀리파/원적외선)를 이용하면 지구 대기의 흡수나 방출을 영향을 받지 않으면서 지상의 저온 장치를 사용하지 않고 저

온 망원경이나 저온 측정 장치를 직접 우주에 설치해서 천체 관측이 가능하다.

## 국내외 연구동향 및 전망

최근 수년에 걸쳐 THz 파에 대한 관심이 전 세계적으로 급속히 확산되고 있는 추세이다. 또한 그만큼 기술의 발전 속도도 빠르게 가속되고 있는 실정이다. 미국에서는 1990년대 중반에 THz파 분광 및 영상기술이 개발되면서 THz파의 발생 및 응용분야에서 전 세계기술을 선도하고 있다. Rensselaer Polytechnic Institute(PRI), 오크라호마 주립대, RICE 대 등 주요대학들에서 연구를 주도하고 있으며 특히 국방, 우주분야의 응용을 중심으로 활발한 연구가 진행중이다. 유럽의 경우 미국과 달리 여러 대학과 연구소가 연구 컨소시엄을 구성하여 연구자원의 효율적인 집중을 도모하고 있다. 현재까지 유럽연합(EU)을 중심으로 수행된 대표적인 컨소시엄 연구 프로젝트로서는 TERA-VISION(2000-2002), THz-BRIDGE(2001-2004), STAR-TIGER (2002) 등이 있으며, 이러한 다국적 팀이 참가한 대형 연구 사업을 통하여 강력하고 소형의 테라헤르츠 소스의 개발과 THz파의 바이오메디컬 응용에 집중하여 연구를 진행해 왔다. 2005년부터 유럽의 10개국 20여 기관이 참여하는 TeraNova Project 를 추진하고 있다. 일본에서는 2005년 일본의 향후 10년간 개발해야할 10대 근간기술로서 THz 기술을 선정, 학계와 연구소를 중심으로 정부주도로 활발한 연구를 진행하고 있다. 그중에서도 이화학연구소(RIKEN)에서는 파장가변 CW THz 소스를 개발하여 우편봉투내의 불법 약물(마약류)을 개봉하지 않고 원격으로 검출하는 기술을 개발하여 세계적인 주목을 받은 바 있으며, LSI 반도체의 결함 검출, 초전도재료에의 응용, 2차원 실시간 영상 기술, 농산물 신선도 판별, 보안 등 다양한 응용기술과 강력한 THz 소스의 개발을 국가적인 프로젝트로 수행하고 있는 것으로 판단된다. 한편 테라헤르츠 시스템의 상업화를 위한 연구도 활발히 진행되어 영국의 Teravision사, 미국의 Picometrix사 그



리고 일본의 Tochigi Nokon사 등에서 THz 파 분광 및 영상장치 시제품을 개발하여 판매중이다.

국내에서도 1990년 중반부터 해외에서 THz 파 관련 전공으로 연구한 과학자들이 귀국하여 서울시립대, 한국해양대, 서울대 등 대학을 중심으로 THz파의 기초연구가 시작되었다. 테라헤르츠 시영역 분광법을 이용하여 반도체, 전도성 폴리머, 탄소나노튜브 등과 같은 물질의 물성에 대한 수행하였다. 포항공대에서는 1998년부터 2000년까지 과학기술부의 창의적 연구진흥사업으로 '테라헤르츠 포토닉스' 연구가 수행되었는데, 집적화된 극소형 테라헤르츠 소스라고 할 수 있는 새로운 구조의 포토믹서를 제작하여 THz 파를 발생시키는데 성공하였고, THz 파의 효과적인 전송을 위한 새로운 개념의 광결정 섬유를 개발하여 THz 파 전송실험에 성공한 바 있다. 이외에도 전북대에서 테라헤르츠 발생용 광결정 성장에 대한 연구를 수행하였으며, 아주대에서는 THz 파 영역의 포토닉 크리스탈에 대한 연구를 진행중이다. 정부 출연 연구소로는 한국표준과학연구원에서 Ultrafast 레이저를 이용한 극초단파 영상시스템 개발에 대한 연구를 수행한 바 있으며 한국원자력연구원에서 원적외선 자유전자레이저에서 발생하는 2-3THz 부근의 THz 파를 이용한 이미징 연구를 수행중이다 한국과학기술연구원에서는 Quantum Cascade Laser(QCL)를 개발하기 위한 기초연구를 진행중이며, 또한 한국전기연구원에서는 2004년부터 초고속 레이저를 이용한 펄스형 THz파의 발생과 분광 및 이미징 응용 연구와 소형의 연속파 테라헤르츠 소스 개발에 대한 연구를 수행중이다.

21세기 사람들은 보다 건강하고 안전하며 멋지고 풍요로운 삶을 살고자 하는 욕구를 갖고 있다. 이 욕구는 점점 더 강해지고 있으며 이를 만족시키기 위한 의료, 신약, 미용, 보안 등의 고부가가치 서비스 산업이 급속히 발전하고 있다. 이러한 유망 산업의

지속적인 성장과 시장 경쟁력 확보를 위해 전 세계적으로 의공학, 생명공학, 보안기술 등의 연구개발 투자가 확대되고 있다. 이러한 추세속에서 아직도 많은 부분이 미개척 분야로 남아있는 테라헤르츠 기술은 21세기의 신산업을 창출할 가능성이 매우 높은 기술분야로서 국내에서도 본격적이며 체계적인 기술 개발이 시급히 이루어져야할 분야로 사료된다.

[참고문헌]

- [1] S.P.Mickan and X.-C. Zhang, "T-Ray Sensing and Imaging", International J. High Speed Electronics and Systems, 13, pp. 601-676, 2003
- [2] D. Dragoman and M. Dragoman, "Review-Terahertz field and applications," Progress in Quantum Electronics 28, pp. 1-66, 2004
- [3] Kodo KAWASE and Hiromasa ITO, "Tera Photonics Sources," 應用物理 71, pp. 167-172, 2002
- [4] P. H. Siegel, "Terahertz technology," IEEE Trans. M. Microw. Theory Tech., 50, pp. 910-928, 2002
- [5] Y. Cai et al., "Coherent terahertz radiation detection; Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection," Appl. Phys. Lett., 73, pp. 444-446, 1998,
- [6] Z. Jiang, X -C Zhang, "Terahertz Imaging via Electrooptic Effect," IEEE Trans. M. Microw. Theory Tech., 47, pp. 2644-2650, 1999
- [7] D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R. G. Baraniuk, J. V. Rudd, and M. Koch : "Recent advances in Terahertz imaging", Appl. Phys. B 68, 1085, 1999