

테라헤르츠 광전자공학

Terahertz Optoelectronics

목 차

- I. 서론
- II. 펨토초 레이저 여기에 의한 THz 펄스파의 발생
- III. THz 펄스파의 검출
- IV. THz 펄스파의 응용
- V. Photomixing에 의한 연속 THz파의 발생
- VI. 결론

강광용 (K.Y. Kang)	테라전자소자팀 책임연구원
백문철 (M.C. Paek)	테라전자소자팀 책임연구원
한석길 (S.K. Han)	테라전자소자팀 초빙연구원
이승권 (S.K. Lee)	테라전자소자팀 위촉연구원
김현탁 (H.T. Kim)	테라전자소자팀 팀장

테라헤르츠 대역(100GHz~10THz)은 광파와 전파의 경계 영역에 존재하며 기술적으로 뒤늦게 개발된 주파수 대역으로 테라헤르츠 대역을 개척하기 위해 최신의 레이저 기술, 반도체 기술 및 고온초전도 기술을 사용하는 새로운 전자기파 기술로 발전하였다. 테라헤르츠 전자파 펄스는 펨토초 광펄스에 의한 초고속 광스위치(광전도 안테나), 반도체 표면, 양자우물 구조 등의 여기(excitation)에 의해 발생하고, 두 가지 연속파(CW) 레이저 빔을 혼합하면 주파수 가변의 테라헤르츠 전자파가 발생한다. 본 논문에서는 이와 같은 THz 전자파 펄스의 발생 및 검출과 THz 응용분야에 대해 기술하고자 한다.

I. 서론

안정된 펨토초(femto second, 1fs=10⁻¹⁵초) 광 펄스(optical pulse)의 이용과 재료공학 등 공학의 최근 성과의 영향으로 가간섭(coherent) 테라헤르츠 전자파(이후, THz 펄스파 또는 THz파로 씀)의 발생이 가능해짐에 따라 이전의 전자파공학에서 출발한 밀리미터파, 서브밀리미터파 공학이나 전통적인 원적외선 분광학의 흐름과는 다른 새로운 연구 분야가 조성되었다. 이런 흐름은 미국 AT&T 벨연구소 Auston 등[1]의 연구가 직접적인 실마리가 되어 벨연구소와 IBM에 의해 이루어진 결과이지만, 최근에는 일본과 유럽의 기여도 대단히 크다. 이 새로운 연구영역은 벨연구소 연구자들의 뜻을 따라 “테라헤르츠 광-전자공학”이라고 명명되었다.

THz 영역은 이 분야의 연구자들 사이에서는 100 GHz~10THz 사이를 지칭한다. 이러한 신기술의 출현은 다른 방법도 번성시켜 THz 영역의 연구를 여러 각도로 살펴볼 때, 1950년대와 1970년대에 이어 3번째 번성기를 맞고 있다. 본 논문에서는 THz 관련 현상을 가능한한 폭넓게 다루고자 하겠지만, 여기서는 주로 펨토초 광펄스와 반도체 및 유전체와의 상호작용에 의한 THz파 발생과 그 응용에 국한하여 기술하고자 한다.

II. 펨토초 레이저 여기에 의한 THz 펄스파의 발생

1. 광스위칭을 사용한 THz파의 발생

광스위치(광전도 안테나라고도 부름)[2]는 (그림 1a)에 표시한 바와 같이 반절연성 갈륨비소(Semi-insulator GaAs) 기판 위에 광전도성 박막을 증착하고, 다시 그 위에 중앙 돌출 부위를 갖는 금속 평행 전송선로(전극도 겹침)를 만든 형태이다. 광전도성 박막은 피코초(pico second, 1ps=10⁻¹²초) 이하의 캐리어(carrier, 운반자) 수명, 높은 캐리어 이동도, 높은 전압 내구성과 같은 조건들을 잘 만족해야 하

는데, 고가의 분자선성장(MBE) 장비로 저온 성장한 갈륨비소 박막(이후 LT-GaAs라고 표시)[3]이 주로 사용되고 있다. (그림 1a)에서 전극 중앙의 돌출한 부위는 소형 다이폴 안테나(dipole antenna)로서 작용한다. 이러한 소자에 바이어스 전압을 가한 상태에서 시간폭이 100 펨토초 이하인 레이저 펄스광을 사용하여 간헐적으로 여기(excitation)시키면, 광 흡수에 의한 캐리어(전자와 정공)가 생성되어 순간적으로 전류가 흐르고, 이 전류의 시간 미분값에 비례하는 THz파(쌍극자 방사)가 발생한다. 즉,

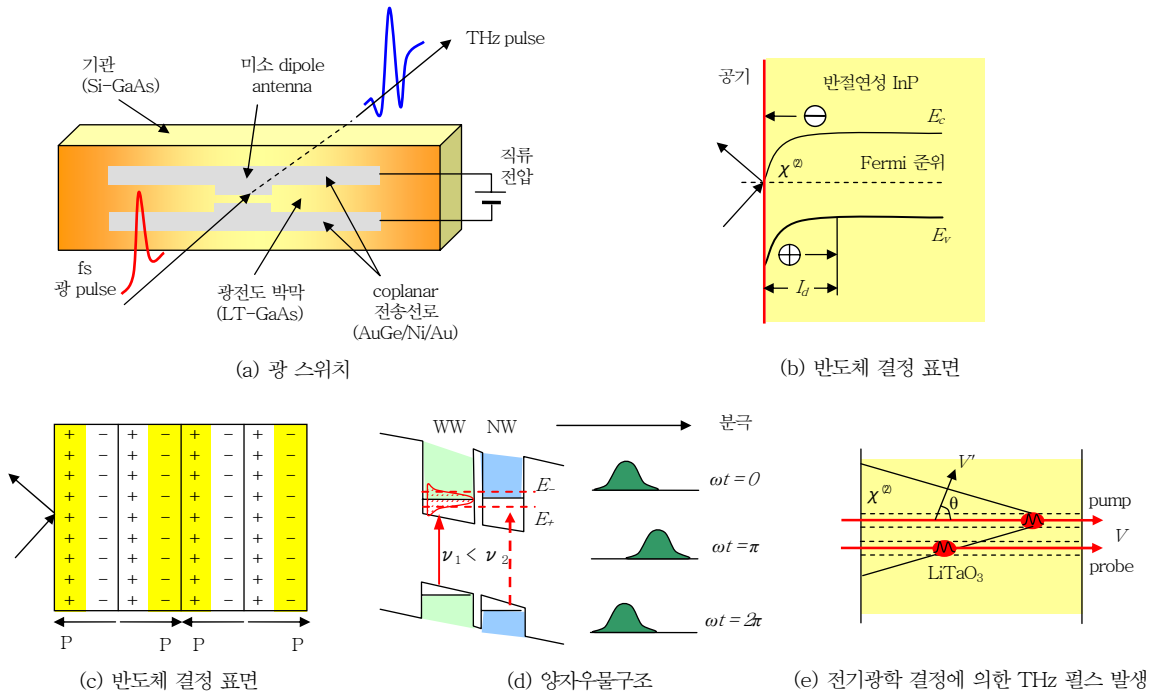
$$E \propto \frac{\partial i(t)}{\partial t} \propto \frac{\partial^2 P(t)}{\partial^2 t} \quad (1)$$

여기서 E 는 원거리(방향)에서의 방사전기장, $i(t)$ 는 광전도전류, $P(t)$ 는 분극이다.

THz파는 유전율이 큰 기판 표면에서 강하게 방사(발생)된다. 발생되는 THz파의 펄스폭은 1ps 이하로써 범용인 ~30fs 이상의 레이저 펄스를 사용하여 광 여기시킬 경우, 푸리에(Fourier) 변환하여 얻게 되는 스펙트럼은 0~수 THz까지의 넓은 스펙트럼을 갖게 된다. 소형 다이폴 안테나의 간격은 5 μ m로서 수백 μ m로 방사되는 THz파의 파장에 비해 충분히 작아서 광펄스에 의해 여기되는 전류가 흐를 때,

● 용어해설 ●

테라헤르츠파-갭(THz-gap): 테라헤르츠파(Terahertz wave, 1THz=10¹²Hz)는 일반적으로 0.1~10THz 대역의 주파수를 가진 전자기파로서 파장으로는 30~3000 μ m(서브-밀리미터파), 광자(photon) 에너지로는 0.4~40meV에 해당함. 지금까지 신뢰성 높은 광원(신호원)의 미비로 다른 파장영역의 전파에 비해 거의 사용이 없었던 영역이어서, 이 주파수 대역을 THz-gap이라고 부름. 그리고 주파수가 높기 때문에 현재의 반도체 소자로는 이 대역에 대응하기 어려워, 아직까지 미답(未踏)의 영역으로 남아 있는 전자기파의 마지막 프런티어 영역임. 그러나 THz파는 기초과학(물리, 화학, 생명), 전자공학(전기, 전자, 재료, 군용전자), 의공학 등 과학기술 분야에서 그 중요성이 크게 증대되고 있을 뿐만 아니라, 차츰 폭넓은 산업응용과 거대한 시장규모가 예상되는 전파자원임.



(그림 1) 펨토초 레이저 여기에 의한 THz 펄스파 발생의 대표적인 예

캐리어는 집단으로 같은 위상으로 움직인다고 생각되므로 발생하는 THz파는 가간섭 방사가 된다.

하나의 소자에서 나오는 출력은 인가하는 바이어스 전압과 여기에 레이저 파워에 따라 변한다. THz 파의 진폭은 바이어스 전압이 작은 경우 여기광 강

도가 작으면 잘 비례하지만, 인가전압이 높은 경우 생성되는 캐리어의 차폐효과(screen effect)에 의하여 더 이상 증가하지 않고 포화되는 경향이 있다. 또한 THz파 출력은 안테나의 형태에 따라서 크게 변화하며 sub- μW ~수십 μW 정도의 발생이 추정된다. 아주 강한 THz 펄스파를 발생시키기 위한 방법으로, 대구경(전극간격=1~35mm)의 광스위치에 높은 바이어스를 인가하고 높은 강도의 펨토초 레이저 펄스로 여기시키는 방법이 있다. 이런 방법으로 강도가 MW급인 sub 피코초의 THz 펄스파를 얻을 수 있다[4]. 대구경의 경우에도 광 스위칭의 경우와 동일하게 출력의 포화경향을 보인다.

● 용어해설 ●

펨토초 레이저(Femto-second laser) 기술: 1974년 Bell Lab.에서 색소레이저를 이용하여 펨토초 영역의 시간폭을 갖는 펄스를 생성한 후, 1986년 펨토초 펄스 생성이 가능한 광대역 발진 스펙트럼을 갖는 티타늄사파이어(Ti:sapphire) 결정이 발견됨. 그 후(1991년), Ti:sapphire 레이저의 모드잠금(mode-locking)에 성공하여, 안정적인 60fs 레이저 펄스 발생이 가능하게 되고, 대표적 펨토초 레이저가 됨. 특히, 티타늄사파이어 레이저는 Kerr-lens 모드잠금[KLM] 방법을 이용하는데 매우 간단한 공진기 구조로 안정적인 펨토초 레이저를 구현할 수 있기 때문에 아주 효과적이고 혁명적인 펨토초 레이저 광원임. 따라서 THz 연구에서 이러한 티타늄사파이어 레이저를 활용하는 연구가 성공적으로 수행되고 있음.

2. 반도체 결정표면에서 THz 펄스파 발생

반도체는 대부분의 경우 표면 근처의 에너지 밴드가 휘어져 공핍층을 형성하고, 표면 전장이 생성되는 상태이다. 이러한 모습을 반절연성 특징을 가지는 p형 InP의 경우에 대하여 표시한 것이 (그림

1b)이다[5]. 표면 전장이 형성되어 있는 반도체 표면에 펨토초 레이저 펄스를 조사하면 레이저 때문에 여기된 캐리어(전자와 정공)가 반도체 표면의 전장에 의해 가속됨으로써 전류가 흐르고(surge 전류라 함), 식 (1)에 따라 THz 펄스파가 발생한다.

InP나 GaAs는 표면 전장이 큰 반도체로서, 이와 같은 반도체에서는 표면근처의 이차비선형 광학효과, 소위 $\chi^{(2)}$ 처리에 의한 입사광 펄스의 광정류 작용에 의하여 발생하는 THz 펄스파를 동시에 방사한다. 광정류 작용에 의한 THz 펄스파 발생 방법은 광결정을 표면에 수직인 축을 기준으로 회전시키면 방사전계가 주기적으로 변화하는 것을 이용하여 surge 전류와 광전류 작용에 의한 THz 펄스파를 분리하고(반도체표면을 수직으로 여기한 경우, surge 전류에 의하여 발생한 THz파는 관측되지 않음) 광정류 작용에 의한 THz 펄스파만을 관측하는 것이다.

InP나 GaAs보다 밴드갭이 좁은 InSb나 InAs 등에서는 표면 전장이 그다지 크지 않아서 광펄스로 표면을 여기시킬 때에 발생하는 전자와 정공의 확산 속도의 차(광전장 효과)에 의해서 표면전류가 흘러, THz 펄스파를 생성시키고 동시에 광정류 효과에 의한 THz 펄스파를 발생(방사)한다. 또한 GaAs나 Te의 경우, GaAs는 표면 전장에 의해, Te은 광전장 효과에 의해, 반도체 내부의 종방향 광학(LO) 포논이 가간섭으로 여기되고(가간섭 특성을 가지도록), 이러한 LO 포논이 거시적인 분극 $P(t)$ 를 동반하고 있기 때문에 적외선 영역에서 활성화된 모드로부터 식 (1)에 따라 THz파가 방사된다(그림 1c) 참조). 한편 LO 포논과 플라즈몬이 결합하여 LO 포논-플라즈몬 모드(mode)를 형성하는 경우, 이 결합 모드로부터도 THz파가 방사된다[6].

반도체 표면에서의 THz파 발생에 대하여 InAs (100) 표면에 수평하게 외부자장(수 Tesla급)을 걸어주면서 펨토초 광펄스를 조사해 주면 강한 THz파가 방사되는 것으로 알려져 있고, THz파 관측을 위해서는 정밀한 계측기가 필요하지만 약 100 μ W 근방의 출력이 가능한 것으로 추측되고 있다[7].

3. 양자우물 초격자에서 THz 펄스파 발생

대표적인 비대칭 이중 양자우물에서의 THz 펄스파 발생개념을 (그림 1d)에 나타내었다. 비대칭 이중 양자우물의 바닥(基底) 양자상태는 넓은 폭을 가지는 양자우물(wide well)과 좁은 폭을 가지는 양자우물(narrow well)을 갖는데 이들의 에너지 준위가 다르다. 이런 양자우물에 바이어스 전압을 인가하여 전도대의 여러 가지 기저 준위를 접근시키면 넓은 폭을 가지는 양자우물과 좁은 폭을 가지는 양자우물의 에너지 준위가 결합하여 에너지 준위 E_+ 와 E_- 를 형성한다.

극초단 광펄스로 전자를 가전자대에서 전도대로 여기시키고 전자파의 파속(wave packet)을 만들면 파속이 터널링효과에 의해 두 개의 양자우물 사이를 왕래하게 된다(주파수 $\Delta E/h$). 여기서 $\Delta E = E_- - E_+$ 이다. 이러한 형태로 진동하는 파속은 시간변화형 분극 $P(t)$ 을 만날 경우, 식 (1)에 따라서 THz 진동파가 발생한다. Roscov 등이 그러한 파의 관측에 성공하였다[8]. 한편, 단일 양자우물에서도 THz파의 발생이 Planken 등에 의하여 관측되었다[9].

반도체로서 초격자 구조를 만들어 전계를 가하면 Bloch 진동이 일어나고 디바이스의 설계를 적당히 할 경우, 진동 주파수는 THz 영역에 들어간다. 초격자에 역바이어스를 가하면서 극초단 광펄스를 조사하면 THz 펄스파가 방사되는 것도 관측되었다[10].

4. 전기광학 체렌코프 방사

전하가 있는 전하분포가 유전체 내부를 전자기파의 위상속도보다 빠르게 움직이면 체렌코프(cherenkov) 방사가 일어난다는 것은 잘 알려져 있지만, 이와 똑같은 현상(체렌코프 방사)을 전기광학(E-O로 표기) 결정을 사용하여 만드는 것도 가능하다. 즉, $\chi^{(2)}$ 값이 높은 전기광학 결정 내부에 펨토초 광펄스를 전파시키면 광정류 작용에 의해, 약 1사이클의 THz 펄스파가 체렌코프 원(circle)을 형성하면서 발생한다(그림 1e) 참조). 전기광학재료로 LiTaO₃를 사용한 실험에서는 0~4THz 영역까지를 포함하

는 THz 펄스파의 발생이 관측되었지만[11], (그림 1e)와 같은 구성은 다루기가 아주 어려워 체렌코프 방사를 좀 더 쉽게 얻을 수 있는 방안이 고려되어야 할 것이다[12].

5. THz 펄스파 발생의 새로운 시도

위에서 기술한 방식 이외에 새로운 시도 두 가지를 열거해보면, 하나는 높은 Q값을 가지는 반도체 미소 공진기에 직류 바이어스 전압을 인가하면서 펌프 초 광펄스로 여기하면 공진기 플라리톤에 의해 THz 펄스파를 발생시킬 수 있다[13]. 또 다른 하나는 II.1절에서 기술한 바와 같은 원리에 기반하여, 광전도 박막 중 우수한 특성을 갖는 기상합성(CVD)법으로 성장한 다이아몬드 박막을 사용하여 여기에 초고속 광전도 소자를 구현한 후, 자외선 극초단 펄스 레이저 광으로 여기하여 고출력의 THz 펄스파를 발생시킨 시도가 있다.

III. THz 펄스파의 검출

방사된 THz 펄스파의 검출에는 ① 광스위칭, ② E-O 효과(포켈스 효과)[14], ③ 자기상관 THz 분광법[15], ④ Martin-Purpelt(diplexer) 간섭계[16] 등을 사용하는 방법이 있다. ③, ④는 광대역의 검출이 가능하지만, 강도까지는 진폭 측정에 한계가 있다. 반면에 ①, ②는 진폭과 동시에 위상검출도 가능한 뛰어난 검출 방법이므로, 여기서는 ①, ② 방식만을 취급하기로 한다. ③, ④는 참고문헌으로 대신한다.

1. 광스위칭에 의한 검출

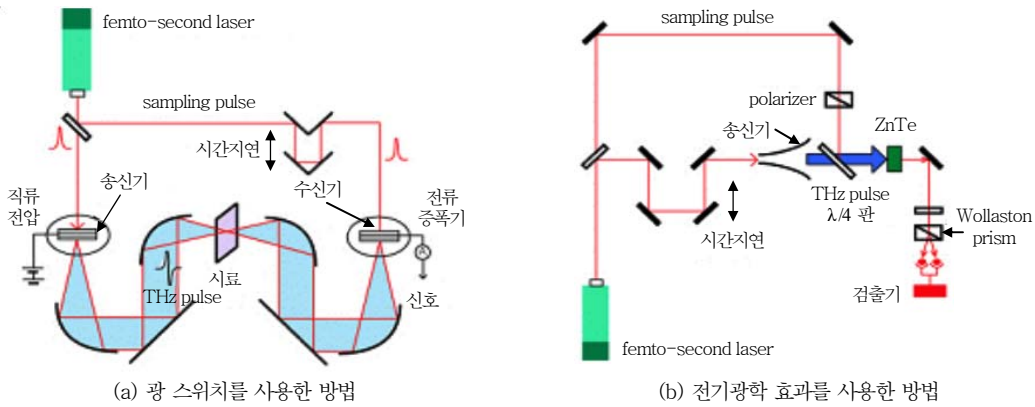
이 경우도, (그림 1a)에서 기술한 것과 동일한 방식을 사용한다. 다만 바이어스 전압을 연결하는 대신에 전류계를 접속하여 사용한다. 검출기 안테나의 기관 뒷면에서부터 THz 펄스파를 집속하고, 이와 동시에 THz 펄스파 발생을 여기하는 광펄스(이후

pump 펄스라고 표기)의 일부를 분리시킨 광펄스로서(이후 sampling 펄스라고 표기) 검출소자의 간극을 여기하여, 캐리어가 생성되는 순간 회로를 닫으면 그 순간에 검출기에 도달한 THz 펄스파의 진폭에 비례하는 전류가 흐르기 때문에 검출되는 THz 펄스파의 진폭세기를 측정하는 것이 가능하다. 이러한 검출법은 발생과 연동시키기 위해, 발생을 포함한 시스템(emitter와 detector를 포함한 전체 시스템)을 (그림 2a)에 표시하였다. THz 펄스파는 여기 광펄스와 같은 주기(70~80MHz)로 방사된다. 검출 방법은 동일 파형의 펄스가 빠른 주기로 반복하여 도달하는 것을 이용하여, pump 펄스와 sampling 펄스 사이에 시간지연을 주어서 파형을 재현하는 방법이다. 이 방법은 결국 직류적으로 수행하고 전류를 사용하는 pump 광에 광 초퍼(chopper)를 사용하여 변조를 주고 lock-in 증폭기로 검출한다. 이 방법에 의한 검출 대역은 종래(~30fs 이상의 광펄스를 사용하는 경우)에는 6~7THz 이하였지만, 최근 15fs의 광펄스 여기 방식을 택한 경우, 60THz까지 확장 검출되는 것을 실험적으로 보였다.

2. 전기광학효과에 의한 검출

원리는 THz 전계를 인가한 E-O 결정을 통과하는 직선 편광된 probe 광의 편광 회전 정도를 검출하여, 입사 THz 전계의 크기를 측정하는 방식이다. E-O 결정으로서는 ZnTe 및 GaP 등이 사용되고, 높은 신호 대 잡음비(SNR)가 얻어진다.

검출하는 개략도를 (그림 2b)에 나타내었다. 광스위칭 방식에서와 마찬가지로 THz 펄스파의 발생과 동시에 행하여진다. THz 펄스파와 probe 광은 수평한 편파면이 단결정 ZnTe의 <110>면에 입사되도록 배치하고, THz 펄스의 전계에 의해 변화된 probe 광은 보상기를 통과한 후, Wollaston 프리즘에서 P, S 두 개의 편광으로 분리되어 광 검출된다. 최근에는 두께 10.3 μ m의 <110> ZnTe 결정을 사용하고 15fs 이하의 폭을 가지는 광펄스로 샘플링하여, 41THz까지 신호를 검출하는 데 성공하였다[17]. 또한 이 방법은 이론상으로는 70THz까지 검출이 가



(그림 2) THz 펄스파 가간섭 검출법

능하다고 발표되었다[18]. 광스위치를 사용할 경우, 검출 대역이 6~7THz 이하라고 일반적으로 믿었던 과거시대에서 E-O 효과를 사용한 방법은 검출(수신) 대역이 넓다는 것으로 주목을 받았지만 광스위치에 의한 검출 방법으로도 넓은 대역의 검출이 가능하다는 것이 실험적으로 증명되었기 때문에 S/N비와 함께 우열을 가리기가 어렵다.

IV. THz 펄스파의 응용

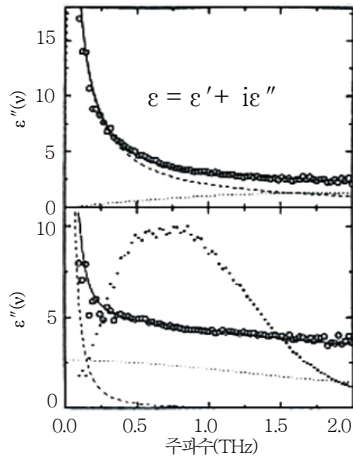
1. 분광학(Spectroscopy)

앞에서 기술한 THz 펄스파를 발생-검출하는 방법은 테라헤르츠 시간영역 분광법(THz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)이라고 하며, 이 방법은 THz 영역의 전자기파에 의해 광대역에서 가간섭한

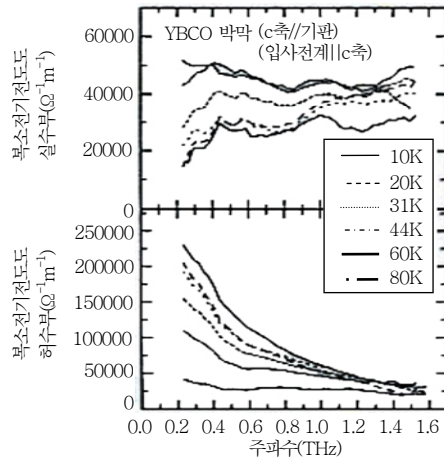
측정이 가능하고 이를 분광에 응용할 경우, 간단한 투과 및 반사 측정으로부터 진폭과 위상에 관련된 정보가 얻어져 초고속으로 변화하는 현상에 대해 시간영역에서의 관측이 가능하다. 또한 이 방법은 상온 측정임에도 불구하고 높은 S/N비로써 측정할 수 있다는 등 우수한 장점을 많이 가지고 있다. 다만 분해능이 실질적으로 2.5GHz 정도만 되기 때문에 그다지 높은 분해능은 기대하기 어렵다. 측정 대상은 기체, 액체, 고체 등이고 예를 들면, 기체에서는 대기오염 문제와 배기가스 문제 등에 응용이 가능할 것으로 생각된다. 실시간 혼합가스 모니터링[19]과 불길 속의 분자조성의 측정[20], 액체에서는 생체와 연관성이 깊고 중요한 물의 측정[21], 아울러 고체에 대해서는 반도체, 유전체, 고온초전도체 등 많은 시료에 대한 측정이 이루어지고 있다. (그림 3a, b)에 물과 고온초전도체[22]의 측정결과를 나타내었다. 이것은 진폭과 위상의 정보를 이용한 것이지만, 시간정보를 이용한 결과로서 가간섭의 LO 포논으로부터 발생한 THz파와 고체 소자 내부의 캐리어 이동에 의하여 발생한 THz파의 관측 결과이다. (그림 4a, b)는 미소 갭(gap)을 가지는 Te, PbTe, CdTe의 LO 포논 진동의 시간축 상에서의 관측 결과와 그것의 푸리에 변환 스펙트럼[23] 및 바이어스 전압을 가한 InP p-i-n 다이오드 내부를 흐르는 자유 캐리어(free carrier)와 격자 진동의 시간축 상에서의 관측과 그것의 푸리에 변환 스펙트럼[24]을

● 용어해설 ●

전기-광학적 샘플링(Electro-optical sampling): 전기-광학적 매질(electro-optic crystal)이 가지고 있는 전기-광학적 효과를 이용한 방법이다. 전기-광학적 효과란 전기장을 전기-광학적 매질에 가함으로써 그 매질의 굴절률이 바뀌는 것을 말한다. 이 중 선형변화인 포켈스 효과(pockel's effect)를 이용하여, 테라헤르츠 전자기파가 매질에 도달했을 때와 그렇지 않았을 때에 보이는 굴절률 변화를 극초단 레이저 펄스 세기의 변화로 측정하는 표본추출법

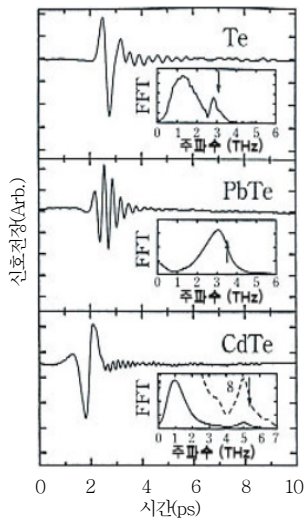


(a) 물의 복소유전율(○ 부분이 측정 값)

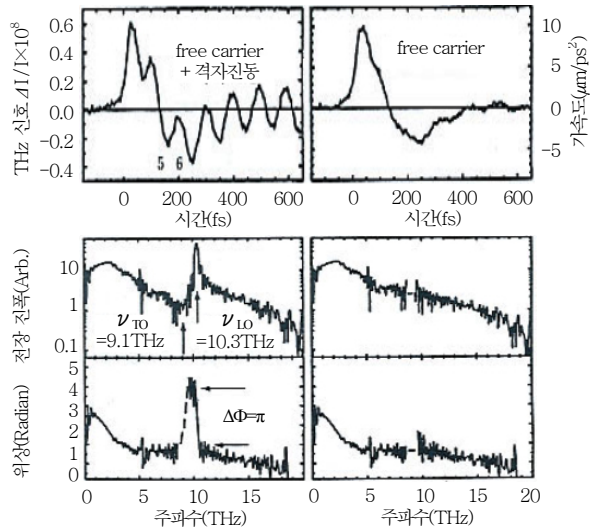


(b) 고온초전도 박막의 복소전기전도도

(그림 3) THz 시간 영역 분광법을 사용한 측정 결과



(a) 가간섭 종모드(longitudinal mode) 광학포논이 발생된 THz파의 관측(광 switch에 의한 검출)



(b) InP p-i-n 다이오드에 바이어스 전압을 걸어준 경우의 free carrier와 격자가 발생한 THz파의 관측(전기광학 효과를 이용한 검출)

(그림 4) 반도체를 이용한 THz파 관측 결과

나타낸다. 전자의 결과는 격자 진동과 그것의 감쇄, 후자의 결과는 자유 캐리어 운동이나 격자에 의한 산란이 시간축 상에서 눈에 보이는 형태로 관측되었다는 점이 독특하다.

최근에는 DNA와 같은 생화학 물질의 분광측정 [25]과 아직 기초단계이지만 돼지의 육질과 같은 생체 분광[26]도 측정 가능하게 되었다.

2. 영상(Imaging)

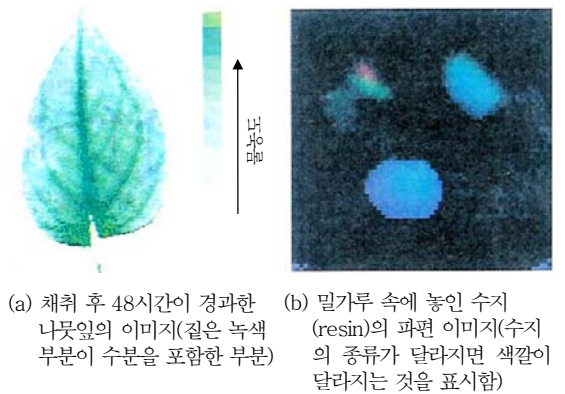
THz 펄스파의 응용으로서, 최근에 아주 활발하게 연구개발이 이루어지고 있는 분야가 imaging이다. THz파는 X-선에 비하면 광자에너지가 약 100만분의 1 차수 정도로 작기 때문에 물질을 이온화하여 손상을 줄 가능성은 상당히 약할 것으로 예상되므로 안전하게 비파괴 검사를 수행할 수 있고, 또한

파장이 X-선과는 다른 관계로 다른 정보를 얻을 수 있다. 영상(imaging)을 얻기 위한 간단한 방법으로는 THz 빔이 집속되는 지점에 위치한 피측정물을 광축에 수직인 면내에서 이차원적으로 이동시켜 화소물질의 신호(펄스 파형)를 기억시켜 놓고, THz 펄스파의 시간차 또는 THz파의 강도차에 의해 imaging을 시행한다(그림 2a 참조). 이와 같은 방법으로 얻은 영상(imaging)의 예를 몇 가지 실었다. (그림 5a)는 나뭇잎의 이미지[27]이고, (b)는 밀가루에 섞은 합성수지 파편의 이미지이다. THz 펄스파는 수분에 강하게 흡수되기 때문에 (그림 5a)에서는 나뭇잎의 내부에 부분적으로 수분이 포함되어 있는 것을 명확하게 보이고 있다. 식물에 대한 응용은 이외에도 수목의 연령추정에도 시험해보려 하고 있다. (그림 5b)는 THz파의 파장이 길어서 산란이 잘 되지 않는다는 특성에 착안하여 실험한 이미지로서 색깔이 다른 것은 합성수지의 종류가 다르기 때문이다. 밀가루 제조 공정에서의 품질관리 등에도 유용할 것으로 생각된다.

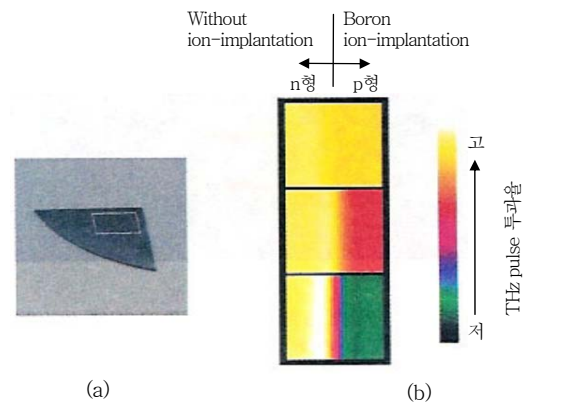
(그림 6a)는 n형 실리콘 웨이퍼에서 떼어낸 칩의 반쪽 부분에 boron 주입량을 변화시켜 가면서 이온 주입한 후에 열처리하고, 나머지 반쪽 부분을 캐리어 밀도가 다른 p형으로 바꾼 시료에 THz 펄스파를 조사하여 영상을 얻은 결과이다. 캐리어 밀도 차에 의한 농도 이미지를 얻을 수 있기 때문에 Drude 모델과 조합하여 일반 실리콘 웨이퍼의 불순물 농도나 이동도의 불균일성 매핑이 가능할 것으로 판단된다. 1 Tesla 정도의 자장을 인가하여 THz 홀(hall) 효과를 사용한 n-GaAs의 불순물 농도와 이동 후의 불균일성의 영상에 대해서는 미국의 Bell 연구소 연구 그룹에 의하여 수행되었다[28].

또한 이미지를 취할 경우, 시료를 이차원적으로 이동시키는 방법에서는 많은 측정시간이 소요된다. Beam 단면적이 큰 THz파를 발생시켜 시료에 조사하고 어레이(array) 구조의 광스위치로 검출하면 시간소요 문제는 개선이 가능하다. 미국 렌세라공과대학(RPI)의 Zhang 교수 연구그룹은 E-O 결정을 사용하고 포켈스 효과에 의한 검출법과 CCD 카메라

를 결합하여 실시간 영상이 가능한 방법을 제안하였다[29]. Bell 연구소 그룹은 THz 펄스파가 매질의 경계면에서 반사되는 성질을 이용하여 반사펄스의 시간차로부터 플로피디스크의 단층 이미지를 얻었다[30]. 또한 도시바-캠브리지 연구그룹은 THz 펄스파를 사용, 썩은 이빨의 이미지 연구를 시행하여 벌레먹은 부위와 건강한 부위의 투과율 차이로부터 선명한 이미지를 얻었다[31]. 이외에 THz 펄스파의 시간 분해능이 sub-ps가 된다는 점을 이용하여 산란물체의 거리와 표면상태의 측정에도 사용하고 있다[32].



(그림 5) THz 펄스파에 의한 이미징(영상)

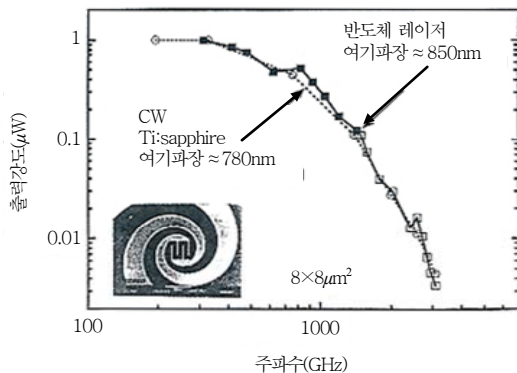


(그림 6) n형 Si-wafer(a)와 그 조각 우측 부분에 Boron 이온을 집어넣은 시료의 THz 이미지 (b). 그림 (b)는 위에서부터 5×10^{13} , 5×10^{14} , $5 \times 10^{15}(\text{cm}^{-2})$ 의 주입량을 집어넣은 직후 열처리 한 것. 좌측 반쪽은 n형, 우측 반쪽은 p형으로 변화하고 있다.

V. Photomixing에 의한 연속 THz파의 발생

THz 영역에서는 종래와는 달리 여러 가지 특징을 가지는 신호원 출현이 강하게 기대되고 있는데, 그러한 기대 중의 하나로서 간결한 CW(연속파) 주파수 가변 가간섭 전자파 신호원이 있다. 1절에서 서술한 바와 같이 최근 LT-GaAs라고 하는 뛰어난 특성을 가진 광전도막이 개발되었기 때문에 photomixing에 의한 CW THz파의 발생 연구가 다시 진행하게 되었다. 강도가 같으면서 주파수가 약간 다른 (ω_1, ω_2 로 표기) 두 개의 CW 레이저 빔을 LT-GaAs 기반 photomixer(그림 1a 참조)의 간극에 파면을 정렬하여 입사시키면, 차주파수($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$)에 해당하는 전류변조가 일어나서 주파수 $\Delta\omega$ 를 가지는 CW THz파가 발생한다. 이때 photomixer에서 방사되는 CW THz파의 출력은 인가하는 전압의 2승과 입사 파워의 2승에 비례한다. 또한 고주파 영역의 특성은 광전도 LT-GaAs 박막의 carrier의 수명(τ), 안테나의 임피던스(R) 및 광스위치부의 커패시턴스(C)의 곱 RC에 의해 결정된다. CW 레이저로서는 CW 발진 반도체 레이저 또는 CW Ti:사파이어 레이저를 사용한다.

McIntosh와 Brown 등은 (그림 7)과 같이 전극 폭 $0.2\mu\text{m}$, 전극간격 $1.8\mu\text{m}$, 면적 $8 \times 8\mu\text{m}^2$ 의 소자에



(그림 7) Photomixing과 주파수 출력 특성

서 주파수 특성 결과를 얻었다[33]. Verghees 등은 소자를 77K까지 냉각하고, $\sim 90\text{mW}$ 의 조사로서 2.5 THz에서 $0.2\mu\text{W}$ 의 출력을 얻었다고 보고하였다[34]. 실용성을 고려해 볼 때, 상온사용이 요망되지만, THz 디바이스의 주파수 안정화와 출력 향상을 지향한 MOPA 시스템의 개발과 진행과정 photomixer의 개발이 주목된다. 이런 종류의 신호원은 스펙트럼 선폭을 1MHz 이하까지 제어할 수 있고, 고분해능의 분광[35]이나 헤테로다인 수신기의 신호원으로서 유망하다고 보여진다.

VI. 결론

최근 현저히 발전하고 있는 THz-광 일렉트로닉스라고 불리는 분야 중에서 주로 반도체 디바이스나 반도체 표면 혹은 고온초전도 디바이스에 펄스 레이저로 여기시켜 THz 펄스파를 발생시키는 방법과 발생된 THz파의 응용 그리고 두 개의 CW 레이저 빔을 사용한 photomixing에 의하여 CW-THz파를 발생시키는 THz파의 발생과 응용에 대하여 국내외 연구 현황을 리뷰하였다.

1980년대 후반부터 하강곡선을 그려온 광파와 전파의 경계영역 연구가 활발히 이루어져 기초부터 응용까지 새로운 연구 성과가 끊임없이 생산되고 있다. 이것은 레이저와 반도체의 신기술응용에 의하여 유도된 결과이지만, 이중에서도 특히 펄스 레이저와 저온성장 갈륨비소(LT-GaAs)의 기여가 아주 컸다. 최근 펄스 레이저의 괄목할 만한 발전은 5fs씩 자른 펄스폭을 낼 수 있는 레이저와 증폭기를 일체 화시켜 조작이 간단한 고출력의 레이저를 이용할 수 있었기 때문에 새로운 지식을 얻을 수 있다는 것과 응용 분야가 더욱 더 넓어지는 것이 기대된다. 또한 현재로서는 레이저 발진과 광전도 박막의 동작도 800nm 근방에 국한되어 있지만, $1.5\mu\text{m}$ 파장대역에서 펄스 레이저 조사에 의한 THz 펄스파의 발생 연구를 수행할 수 있다면, 통신분야에 대한 응용도 확대 가능할 것으로 기대되고 있다.

약어 정리

CVD	Chemical Vapor Deposition
CW THz	Continous Wave THz
E-O	Electro-Optical
LO	Longitudinal Optical
LT-GaAs	Low Temperature GaAs
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOPA	Master Oscillator and Power Amplifier
p-i-n	Positive-Intrinsic-Negative
THz-TDS	THz Time Domain Spectroscopy
THz	Terahertz

참고 문헌

- [1] D.H. Auston, K.P. Cheung, and P.R. Smith, "Pico-second Photoconducting Hertzian Dipoles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.45, 1984, p.284.
- [2] M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, "Emission Characteristics of Photoconductive Antennas Based on Low-temperature-grown GaAs and Semi-insulating GaAs," *Appl. Opt.*, Vol.36, 1997, p.7853.
- [3] G. Gupta, J.F. Whitaker, and G.A. Mourou, "Ultrafast Carrier Dynamics in III-V Semiconductors Grown by Molecular-beam Epitaxy at Very Low Substrate Temperatures," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.28, 1992, p.2464.
- [4] D. You, R.R. Jones, P.H. Bucksbaum, and D.R. Dykaar, "Generation of High-power Sub-single-cycle 500-fs Electromagnetic Pulses," *Opt. Lett.*, Vol.18, 1993, p.290.
- [5] X.C. Zhang, B.B. Hu, J.T. Darrow, and D.H. Auston, "Generation of Femtosecond Electromagnetic Pulses from Semiconductor Surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, 1990, p.1011.
- [6] P. Gu, M. Tani, K. Sakai, and T.R. Yang, "Detection of Terahertz Radiation from Longitudinal Optical Phonon-plasmon Coupling Modes in InSb Film Using an Ultra-broadband Photoconductive Antenna," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.77, 2000, p.1798.
- [7] N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, and Z. Liu, "High Average-power THz Radiation from Femtosecond Laser-irradiated InAs in a Magnetic Field and Its Elliptical Polarization Characteristics," *J. Appl. Phys.*, Vol.84, 1998, p.654.
- [8] H.G. Roskos, M.C. Nuss, J. Shah, K. Leo, K.A.B. Miller, A.M. Fox, S. Schmitt-Rink, and K. Koehler, "Coherent Submillimeter-wave Emission from Charge Oscillations in a Double-well Potential," *Phys. Rev. Lett.*, 1992, Vol.68, p.2216.
- [9] P.C.M. Planken, "Terahertz Emission in Single Quantum Wells after Coherent Optical Excitation of Light Hole and Heavy Hole Excitons," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.69, 1992, p.3800.
- [10] C. Waschke, H.G. Roskos, R. Schwedler, K. Leo, H. Kurz, and K. Koehler, "Coherent Submillimeter-wave Emission from Bloch Oscillations in a Semiconductor Superlattice," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.70, 1993, p.3319.
- [11] D.H. Auston, K.P. Ceung, J.A. Valdmanis, and D.A. Kleinman, "Cherenkov Radiation from Femtosecond Optical Pulses in Electro-Optic Media," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.53, 1984, p.1555.
- [12] B.B. Hu, X.C. Zhang, K.H. Auston, and P.R. Smith, "Free-space Radiation from Electro-optic Crystals," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, 1990, p.1506.
- [13] Y. Hokomoto, Y. Kadoya, and M. Yamanishi, "THz Electromagnetic Wave Radiation from Coherent Oscillation of Exciton Population in High-Q Semiconductor Microcavities," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, 1999, p.3839.
- [14] Q. Wu, M. Litz, and X.C. Zhang, "Broadband Detection Capability of ZnTe Electro-optic Field Detectors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.68, 1996, p.2924.
- [15] S.E. Ralph and D. Grishkowsky, "THz Spectroscopy and Source Characterization by Optoelectronic Interferometry," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.60, 1992, p.1070.
- [16] D.H. Martin and E. Puppelt, "Polarised Interferometric Spectrometry for the Millimetre and Submillimetre Spectrum," *Infrared Phys.*, Vol.10, 1970, p.105.
- [17] R. Huber, A. Brodschelm, F. Tauser, and A. Leitenstorfer, "Generation and Field-resolved Detection of Femtosecond Electromagnetic Pulses Tunable Up to 41THz," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.76, 2000, p.3191.
- [18] A. Leitenstorfer, S. Humsche, J. Shah, M.C. Nuss, and W.H. Knox, "Detectors and Sources for Ul-

- trabroad-band Electro-optic Sampling: Experiment and Theory," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, 1999, p.1516.
- [19] R.H. Jacobsen, D.M. Mittleman, and M.C. Nuss, "Chemical Recognition of Gases and Gas Mixtures with Terahertz Waves," *Opt. Lett.*, Vol.21, 1996, p.2011.
- [20] R.A. Cheville and D. Grischkowsky, "Far-infrared Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Flames," *Opt. Lett.*, Vol.20, 1995, p.1646.
- [21] C. Ronne, P.O. Astrand, and S.R. Keiding, "THz Spectroscopy of Liquid H₂O and D₂O," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.82, 1996, p.2888.
- [22] C. Ludwig, T. Sekinger, J. Kuhl, M. Tani, K. Sakai, M. Hangyo, S. Miyazawa, and M. Mukaide, "Electrodynamical c-Axis Properties of YBa₂Cu₃O₇ - Thin Films in the THz Frequency Regime," *Physica Stat. Solidi B. Basic Research*, Vol.213, 1999, p.405.
- [23] M. Tani, R. Fukasawa, H. Abe, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, "Terahertz Radiation from Coherent Phonons Excited in Semiconductors," *J. Appl. Phys.*, Vol.83, 1998, p.2473.
- [24] A. Leitenstorfer, S. Hunsche, J. Shah, M.C. Nuss, and W.H. Knox, "Femtosecond Charge Transport in Polar Semiconductors," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.82, 1999, p.5140.
- [25] A.G. Markelz, A. Roitberg, and E.J. Heilweil, "Pulsed Terahertz Spectroscopy of DNA, Bovine Serum Albumin and Collagen between 0.1 and 2.0THz," *Chem. Phys. Lett.*, Vol.320, 2000, p.42.
- [26] D.D. Arnone et al., "Applications of Terahertz(THz) Technology to Medical Imaging," *Proc. SPIE*, Vol. 3828, 1999, p.209.
- [27] B.B. Hu and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Opt. Lett.*, Vol.20, 1995, p.1716.
- [28] D.M. Mittleman, J. Cunningham, and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, 1997, p.161.
- [29] Q. Wu, T.D. Hewitt, and X.C. Zhang, "Two-dimensional Electro-optic Imaging of THz Beams," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, 1996, p.1026.
- [30] D.M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M.C. Nuss, "T-ray Tomography," *Opt. Lett.*, Vol.22, 1997, p.904.
- [31] C.M. Ciesla, D.D. Arnone, A. Corchia, D. Crawley, C. Longbottom, E.H. Linfield, and M. Papper, "Biomedical Applications of Terahertz Pulse Imaging," *Proc. SPIE, Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers II*, Vol.3934, San Jose, 2000, p.73.
- [32] R.A. Cheville and D. Grischkowsky, "Time Domain Terahertz Impulse Ranging Studies," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.67, 1995, p.1960.
- [33] E.R. Brown, K.A. McIntosh, K.B. Nichols, and C.L. Dennis, "Photomixing Up to 3.8THz in Low-temperature-grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.66, 1995, p.285.
- [34] S. Verghese, K.A. McIntosh, and E.R. Brown, "Optical and Terahertz Power Limits in the Low-temperature-grown GaAs Photomixers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, 1997, p.2743.
- [35] S. Matsuura, M. Tani, H. Abe, K. Sakai, H. Ozeki, and S. Saito, "High-Resolution Terahertz Spectroscopy by a Compact Radiation Source Based on Photomixing with Diode Lasers in a Photoconductive Antenna," *J. Mol. Spectrosc.*, Vol.187, 1998, p.97.