광전도안테나에 의한 광대역테라헤르츠파의 발생특성

論 文
54C-6-9

Generation of Ultra-Wideband Terahertz Pulse by Photoconductive Antenna

陳 潤 植† · 金 根 柱* · 孫 采 化** · 鄭 淳 信** · 金 志 炫* · 全 錫 基**
(Jin Yun-Sik · Kim Geun-Ju · Shon Chae-Hwa · Jung Sun-Shin · Kim Jeehyun · Jeon Seok-Gy)

Abstract - Terahertz wave is a kind of electromagnetic radiation whose frequency lies in 0.1THz ~ 10THz range. In this paper, generation and detection characteristics of terahertz (THz) radiation by photoconductive antenna (PCA) method has been described. Using modern integrated circuit techniques, micron-sized dipole antenna has been fabricated on a low-temperature grown GaAs (LT-GaAs) wafer. A mode-locked Ti:Sapphire femtosecond laser beam is guided and focused onto photoconductive antennas (emitter and detector) to generate and measure THz pulses. Ultra-wide band THz radiation with frequencies between 0.1 THz and 3 THz was observed. Terahertz field amplitude variation with antenna bias voltage, pump laser power, pump laser wavelength and probe laser power was investigated. As a primary application example, a live clover leaf was imaged with the terahertz radiation.

Key Words : Terahertz(THz) Radiation, Femtosecond Laser, Photoconductive Antenna, LT-GaAs, Ultra-Wideband Radiation, T-Ray Imaging

1. 서 론

테라헤르츠파는 0.1-10 THz 범위의 주파수를 가진 전자기파를 지칭하며 파장으로는 30 μm - 3 mm, 광자 에너지로는 0.4-40 meV에 해당한다. 테라헤르츠파는 마이크로파와 적외선 사이에 놓여 있어 기존의 전파와 광 영역 사이에 위치하는데, 이 대역은 일반적으로 사용되는 전자기술과 광학기술의 기술적 한계영역에 속하게 되어 전자기 스펙트럼 중 가장 접근하기 어려운 영역의 하나로 알려져 있다. 그러나 최근 십수 년간 재료기술의 발전과 초미세 공정기술의 발달로 말미암아 새로운 고출력 테라헤르츠 소스들이 등장하였는데, 특히 소형 저가격의 펨토초 레이저의 상용화는 극초단, 고휘도의 테라헤르츠파 발생기술을 한층 가속화 하였다. 이 기술은 테라헤르츠파의 발생 방법에 따라 구분한 펄스형과 연속형 테라헤르츠파 중에 펄스형에 속하는데, 그 주기가 피코초 이하의 짧은 펄스 형태이므로 주파수 영역으로 변환하면 수백 GHz 에서 수(십) THz 에 이르는 초광대역의 주파수를 갖는 전자기파를 얻을 수 있다.

광전도 안테나(photoconductive antenna)를 이용하여 테라헤르츠 영역에 속하는 수백 펨토초의 펄스폭을 가진 초고속 전자기펄스의 발생과 계측은 지난 십여 년간 가장 많이 사용되어 온 방법으로서 무엇보다도 높은 효율과 좋은 스펙트럼 특성을 가진다[1]. 광전도 안테나에 의해 발생된 테라헤르츠파는 이미 다양한 분야에 응용되고 있다. THz 전자기 펄스는 밀리미터에서 서브 밀리미터에 이르는 스펙트럼 영역에서의 물질의 흡수와 분산특성을 결정하기 위한 테라헤르츠 시영역 분광법(THz-TDS)에 사용되어져 왔다 [2]. 또한 테라헤르츠 펄스는 유전체, 반도체 그리고 생체조직 등과 같은 다양한 재료에 대한 영상 응용(T-Ray Imaging)에도 폭넓게 이용되고 있다[3].

본 논문에서는 펨토초 티타늄 사파이어(Ti:Sapphire) 레이저로 여기한 광전도 안테나를 이용한 테라헤르츠파의 발생 및 계측에 대해 기술한다. 일반적인 광전도 안테나 방식의 동작특성인 안테나 전극에서의 바이어스 전압, 여기용 펨토초 레이저의 출력에 따른 테라헤르츠파의 신호 변화뿐만 아니라 펌프 레이저 광의 파장 변화에 따른 테라헤르츠(이하, 경우에 따라서 "THz"로 줄여서 표현함) 신호의 응답에 대해서도 조사하였다. 또한 발생되고 계측된 전자파의 파형 및 주파수의 검증을 위하여 대기 중의 수분에 의한 흡수 특성을 조사하였고, 이미징 시스템의 적용 가능성을 위한 기초실험으로서 살아있는 클로버 잎의 T-Ray 영상 예를 보고한다.

2. 테라헤르츠 시스템의 구성

2.1 안테나의 구조와 제작

테라헤르츠파의 발생 및 검출을 위한 안테나 구조를 그림 1의 (a), (b)에 나타내었다. 테라헤르츠 발생용 안테나로서 200 μm의 간격을 가진 공면 스트립라인(coplanar strip line) 안테나를 사용하였고, 검출용 안테나로서 5 μm의 좁은 간격을 가진 쌍극자 (dipole) 안테나를 제작하였다. 스트립 라

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究院 電氣物理그룹 責任硏究員
E-mail : ysjin@keri.re.kr
* 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 電氣物理그룹 責任硏究員
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 電氣物理그룹 硏究員
接受日字 : 2005年 3月 15日
最終完了 : 2005年 4月 20日

인의 두께는 50 μm (emitter) 와 5 μm (detector) 이며 길이는 1.5 cm이다. 발생기와 검출기 안테나는 저온성장 GaAs (LT-GaAs) 박막위에 형성하였는데 LT-GaAs 박막은 매우 높은 항복전계 (~ $5x10^5$ V/cm), 피코초 이하의 캐리어 수명, 높은 비저항(~ 10^7 Ωcm) [4]과 더불어 비교적 높은 이동도(~ 200 $cm^2V^{-1}s^{-1}$)[5]를 가지고 있어 광전도 안테나를 만들기 위한 최적의 재료로 알려져 있다. LT-GaAs 막은 분자선 에피탁시의 방법으로 SI-GaAs 기판위에 250도의 저온으로 성장한 후 600도에서 10분간 어닐링하여 제작된 것을 사용하였다. 기판과 LT-GaAs 막의 두께는 각각 635 μm와 1 μm 이다. LT-GaAs막 위의 안테나의 금속 스트립 라인은 Au/Ni 박막이며 그 두께는 3 μm 이다.

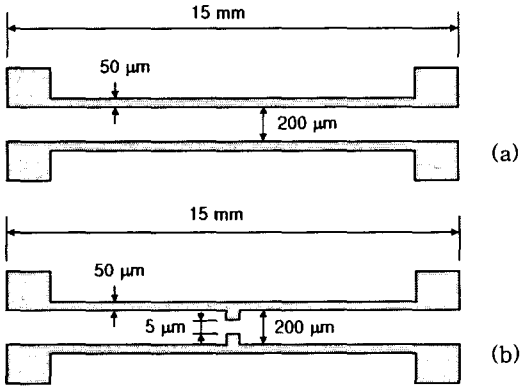


그림 1 테라헤르츠 이미터 안테나(a) 와 검출용 안테나 (b)의 구조
Fig. 1 Structure of terahertz antenna (a) emitter antenna, (b) detector antenna

테라헤르츠파의 발생을 위해서 동면 스트립라인은 DC 바이어스 전압이 인가된다. 반도체의 밴드갭(GaAs 반도체의 경우, Eg = 1.43 eV) 보다 큰 광자에너지를 가진 펨토초의 광펄스가 광전도 갭을 여기시키면 레이저 조사점에 전자와 홀이 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 원거리 방사파(far-field radiation) 는 안테나에 흐르는 전류의 시간 변화에 비례하게 된다[6].

$$J = env_h + (-e)nv_e \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\propto \partial J/\partial t \propto ev\partial n/\partial t + en\partial v/\partial t$$

$$v = v_e - v_h \quad \cdots\cdots (2)$$

여기에서 n은 캐리어 밀도, v_h 와 v_e 는 정공과 전자의 평균속도이다. 식 (2)에서 테라헤르츠파 전계는 첫 번째 항이 나타내는 캐리어 밀도(전하) 변화 효과와 두 번째 항이 나타내는 바이어스 전계에 의한 전하의 가속효과에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

2.2 테라헤르츠파의 발생과 측정

그림 2에 광전도 안테나에 의한 테라헤르츠파의 발생 및 계측을 위한 전체시스템의 구성을 보인다. 여기용 레이저는 상용의 모드 잠금 티타늄 사파이어 레이저(Spectra Physics MaiTai)이며, 발진파장 780-920 nm에서 펄스폭은 70-120 fs 를 가지며 반복율은 80 MHz, 평균출력은 600-1200 mW 이다. 그림 3에 레이저의 동작특성을 보이고 있는데, 파장이 길어질수록 출력이 떨어지고 펄스폭은 길어짐을 알 수 있다. 본 실험에서는 레이저 파장을 비교적 동작 특성이 우수한 800 nm에 고정하여 사용하였다. 레이저에서 나온 펨토초 레이저 빔은 빔 분배기에 의하여 이미터 안테나를 여기하기 위한 펌프빔과 THz 신호를 측정하기 위한 검출빔으로 나누어진다. 레이저 빔은 렌즈에 의해 집속되어 광전도 안테나의 바이어스 된 갭에 조사된다. 무수차(無收差)의 초반구형(hyper-hemispherical) 실리콘 렌즈를 THz 이미터와 검출기의 뒷면(스트립 라인이 설치되지 않은 쪽)에 부착함으로서 THz 펄스의 안테나와 자유공간 사이의 결합을 증가시키고 또한 THz 빔을 집속하는 효과를 내도록 하였다[7]. 이미터 다음의 두개의 off-axis parabolic 미러는 THz 빔을 시료에

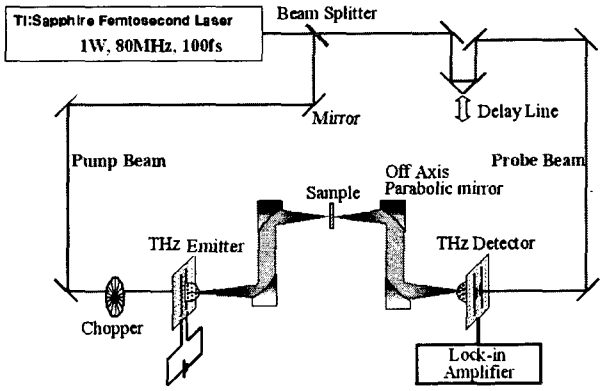


그림 2 광전도 안테나를 이용한 테라헤르츠파 발생 및 계측 시스템 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of THz generation and detection system by photoconductive antenna

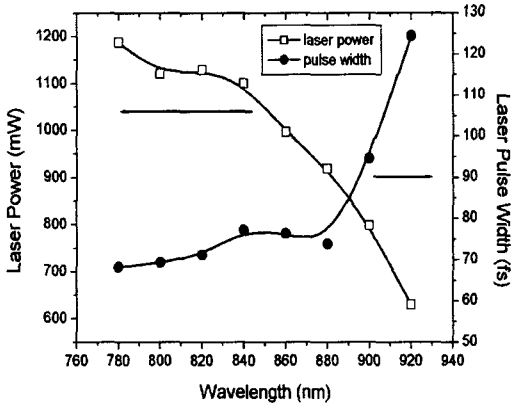


그림 3 모드 잠금 펨토초 티타늄 사파이어의 동작특성
Fig. 3 Operation characteristics of mode-locked femtosecond Ti : Sapphire laser

집속하기 위한 것이고 다음의 두개는 시료에서 투과된 THz 빔을 모아서 검출기 안테나에 집속시키기 위한 것이다. 검출기 안테나는 빔 분배기에 의해 펌프빔으로부터 분리되어 나온 펨토초의 검출빔에 의해 트리거된다. 검출기 안테나에서는 펨토초 레이저 펄스와 발생된 THz 파가 동시에 도달하는 것이 요구된다. 따라서 빔 분배기로부터 검출기에 이르는 두개의 빔 경로 길이가 적어도 수 mm 범위내로 같아지도록 광학시스템을 잘 배치할 필요가 있다.

레이저 펄스가 안테나에 도달하면 전자, 정공이 표면에 생성되고 이들 캐리어는 동시에 도달된 THz 전자파의 전계에 의해 바이어스 되어 안테나의 전극쪽으로 가속되고 이때 흐르는 미세 전류는 THz파의 전계에 비례한다. THz 펄스의 파형은 펌프 펄스에 대한 검출 펄스의 시간지연을 조절함으로써 측정된다. 즉, 그림 2의 광 지연기(delay line)를 이용하여 검출기 안테나에 도달하는 검출빔의 지연시간을 THz 펄스의 처음부터 끝까지에 해당하는 시간동안 순차적으로 변화시켜 각각의 지연시간에서 얻은 값들을 재조합함으로서 원래의 THz파형을 파악할 수 있게 된다. 측정시의 시간분해능은 LT-GaAs의 캐리어 수명과 샘플링 레이저 펄스(검출펄스)의 펄스폭에 의존한다. 신호대 잡음비를 개선하기 위하여 펌프빔은 기계식 초퍼를 이용하여 1.5kHz로 변조시켰다. 검출기 안테나로부터의 출력신호는 Lock-in Amplifier를 이용하여 측정하였다.

3.실험결과및고찰

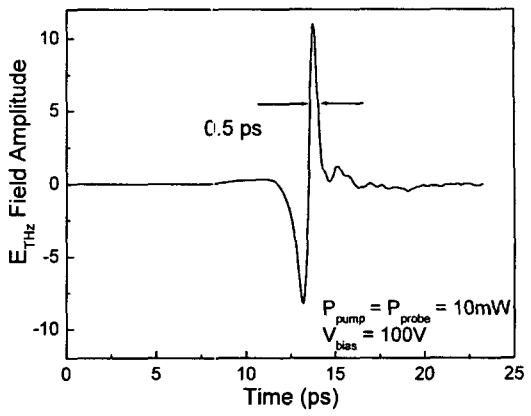
3.1테라헤르츠파스펙트럼특성

광전도 안테나로 발생된 테라헤르츠 전자기파 펄스의 전형적인 파형을 그림 4 (a)에 보인다. 안테나 전극사이의 바이어스 전압은 100 V(E_{bias} = 5 kV/cm) 이며 펌프와 검출을 위한 레이저 출력은 10 mW이다. 그림 4 (a)에서 주펄스의 반폭치(FWHM)는 약 0.5 ps 로 측정되었으며 THz 신호의 신호대 잡음비(SNR)는 1,000 이상으로 나타났다. 그림 4 (b)는 시역역 파형인 그림 4 (a)를 후리에 변환한 주파수 영역의 스펙트럼을 보인다. 스펙트럼 분포는 0.3 - 0.5 THz 부근에서 최대를 보이고 3 THz까지 뻗쳐 있음을 알 수 있다. 스펙트럼의 반폭치는 약 1 THz로 측정되었다.

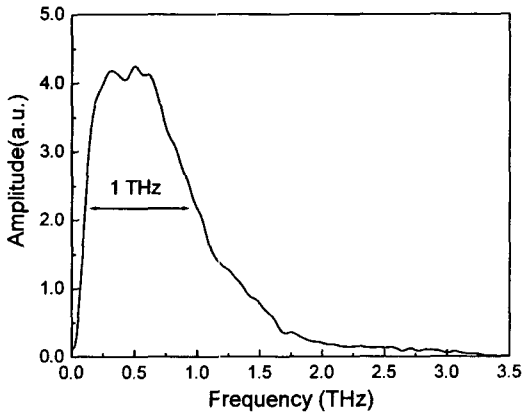
유전체 기판위에 형성된 쌍극자 안테나의 공진주파수 ν_r 은 다음 식으로 근사할 수 있다[8].

$$\nu_r = \frac{c}{\lambda_r} = \frac{c}{2l_e\varepsilon_e^{1/2}} = \frac{c}{2l_e[(1+\varepsilon_d)/2]^{1/2}} \quad \cdots\cdots (3)$$

여기에서 λ_r 은 공진파장 (resonance wavelength), ε_d 와 ε_e 는 기판의 유전율(THz 영역에서 GaAs ε_d = 13)과 $\varepsilon_e = (1+\varepsilon_d)/2$ 로 정의되는 유효 유전율이다. l_e 는 쌍극자의 유효길이를 나타낸다. 그림 1 (a)에서 이미터 안테나의 스트립 라인의 간격(200 μm)을 유효길이로 가정하면 공진주파수는 0.28 THz 로 계산된다. 이 주파수는 그림 4 (b)의 주파수 스펙트럼에서 최대 값을 가지는 주파수와 거의 일치함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4 (a) 전형적인 THz 펄스 파형, (b)주파수 스펙트럼

Fig. 4 (a) Typical time domain THz waveform, (b) Frequency Spectrum

3.2 바이어스 전압과 레이저 파라메타에 따른 테라헤르츠파의 발진특성

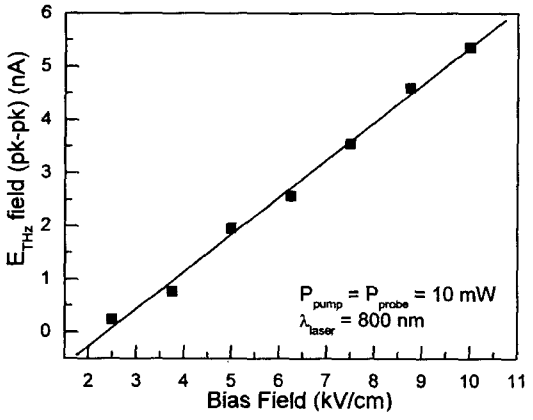
광전도 안테나 방식의 THz 발생에서 THz파의 출력은 안테나 자체의 특성과 여기용 레이저 광의 특성에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 안테나 바이어스 전압, 여기광 강도와 여기파장에 대한 THz 파의 전계강도의 의존성을 조사하였다. 본 실험에서 사용한 동면의 스트립 라인 안테나로부터의 THz 전계의 피크치는 다음 식 (4)와 같이 주어진다[6].

$$E_{THz}^{peak} = e\mu\tau_{int}[(1-R)/hf](P_{in}/g)(V_b/g) \quad \cdots\cdots (4)$$

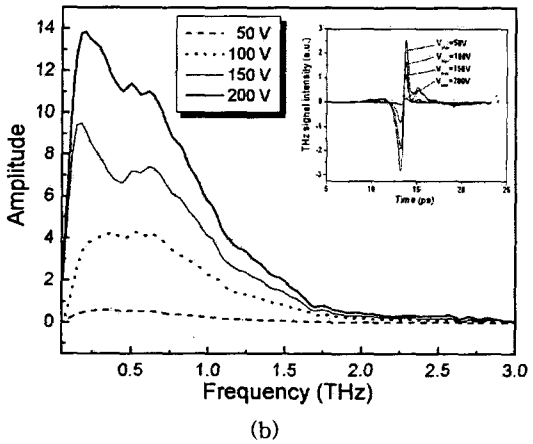
τ_{int} 는 레이저 펄스 사이의 시간 간격, μ 는 캐리어의 이동도, R 은 기판의 레이저 빔 반사율, hf 는 펌프 레이저의 광자에너지, g 는 쌍극자의 간격, P_{in} 은 펌프 레이저의 평균 출력이며 V_b 은 안테나 양단의 바이어스 전압을 나타낸다. 상기 식으로부터 광전도 안테나로부터의 THz 전계의 세기는 바이어스 전압과 펌프 레이저의 광 강도에 선형적으로 비례할 것으로 예상된다.

그림 5 (a)은 THz 전계 강도의 바이어스 전압 의존성을

보여준다. 펌프와 검출을 위한 레이저 강도는 10 mW로 고정하였다. 가로축은 피코초 단위의 시간(지연시간)이며 세로축은 검출용 안테나에서 측정된 THz 파형의 최대값에서 최소값을 뺀 값이다. 바이어스 전압이 바뀌어도 THz 파의 파형이나 후리에 변환된 스펙트럼의 큰 변화는 관찰되지 않았다 (그림 5 (b)참조). THz 전계 세기는 바이어스 전압에 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 이는 식 (4)에서 예측한 것과 잘 일치하는 결과이다. THz 방사의 최대 강도는 이미터 안테나의 항복전압으로 인해 제한되었다. 20 mW의 펌프광 출력 강도일 때, 바이어스 전압 240V (전계강도 Eb = 12 kV/cm) 이상에서 이미터 안테나의 손상이 관찰되었다 (그림 6). 그림 6에서 손상이 일어난 부분은 바이어스 전극의 양극 근방으로서, 광전도 안테나에서의 레이저 광의 집속위치가 이 부근에서 최대의 THz파의 출력이 얻어지는 것으로 알려져 있으며[9], 본 실험결과에서도 이와 같은 사실이 확인되었다. 이러한 손상의 원인은 레이저 스폿 주위의 국부적인 과전류에 의한 과열에 기인하는 것으로 추정된다.



(a)



(b)

그림5. (a) THz 전계강도의 바이어스 전압 의존성 (b) 바이어스 전압변화에 따른 THz 파형 및 스펙트럼의 변화

Fig. 5 (a) THz electric field vs. bias voltage (b) Variation of THz waveform and spectrum with bias voltage change

그림 6 고전압 바이어스 전계에 따른 LT-GaAs 이미터 안테나의 손상(레이저 출력 20 mW, 바이어스 전압 240 V, 스트립 라인 선폭 50 μm)

Fig. 6 Damage of LT-GaAs emitter antenna by a high voltage bias (laser power 20 mW, bias voltage 240 V, linewidth of stripline 50 μm)

그림 7에 THz 전계의 펌프 레이저 광강도에 대한 의존성을 보인다. 이때 바이어스 전압은 100 V이며 검출광 레이저 출력은 10 mW 이다. THz 신호는 레이저 출력이 20 mW까지는 거의 선형적으로 증가하지만 20 mW 이상에서는 포화하는 경향을 보인다. 이와 같은 포화현상은 여기된 광 캐리어가 바이어스 전압을 차폐하기 때문으로 알려져 있다[10]. 즉 반도체 표면에 과잉으로 생성된 전자와 정공이 안테나의 양극과 음극으로 이동하게 되면 이들 하전 입자의 분리에 따른 전계가 형성되고 이 전계는 외부에서 인가하는 바이어스 전계와는 반대 방향을 취함으로서 외부전계를 차폐하는 효과를 나타낸다. 캐리어들의 차폐효과로 인한 포화현상은 다음 식으로 나타내어질 수 있다.

$$E_{THz}^{peak} \propto P_{in}/(P_0 + P_{in}) \propto g(P_{in}/A)/(I_0 + P_{in}/A) \quad \cdots (5)$$

여기에서 P_0 또는 I_0는 포화시점에서의 레이저 출력 또는 강도이며 A 는 레이저의 조사면적이다.

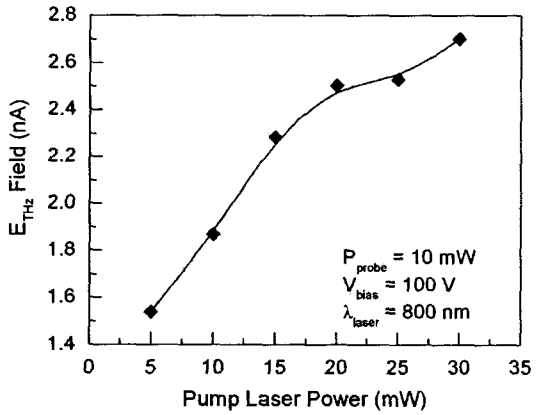


그림7 여기용 펌프레이저 출력에 따른 THz신호의 의존성

Fig. 7 Pump laser power dependency of THz signal intensity

그림 8에 펌프 레이저의 파장을 변화시켰을 때의 THz 파 전계 강도의 변화를 보인다. 그림 9는 THz 파형과 스펙트럼의 변화를 보인다. 각 파장에서의 펌프 및 검출 레이저 출력

은 10 mW로 일정하게 유지하였으며 바이어스 전압은 100 V이다. THz 전계는 레이저 파장이 840 nm까지는 거의 변화가 없으나, 레이저 광자의 에너지가 GaAs 반도체의 밴드갭 에너지 1.43eV(파장 867nm)에 근접하면서 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 여기 레이저 광자의 에너지가 반도체의 밴드갭 에너지보다 낮을 경우 충분한 광 캐리어를 만들 수 없기 때문에 THz 파의 발진효율이 급격히 떨어지는 사실을 입증하는 결과이다. 또한 그림 10의 주파수 스펙트럼도 펌프파장이 길어질수록 저주파수 영역으로 옮겨감을 보여주고 있는데 이는 그림 4에 보인 펌프 레이저의 동작특성에 기인한 것으로 장파장 영역의 레이저 펄스폭이 증가하기 때문으로 추정된다.

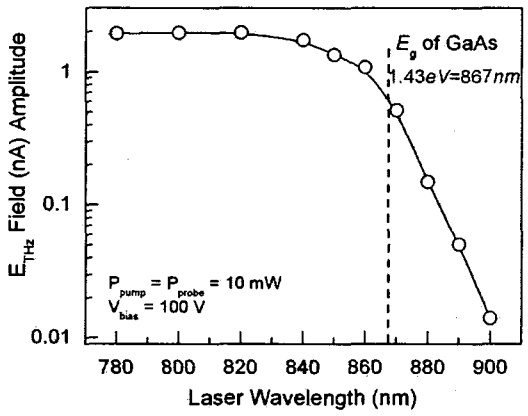


그림 9 테라헤르츠파 전계의 여기파장에 대한 의존성

Fig. 9 Dependency of THz electric field with wavelength of pumping laser

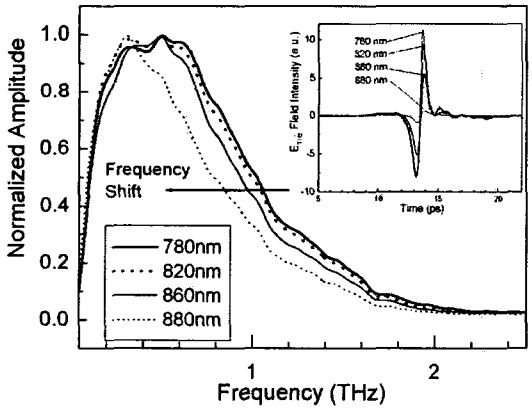


그림 10 펌프레이저의 여기파장에 따른 파형 및 스펙트럼의 변화

Fig. 10 Variation of THz waveform and spectrum with wavelength of pumping laser

3.3검출기 안테나의 동작특성

이미터에서 발생된 THz 전계는 검출용 안테나의 전극사이에 순시적인 바이어스 전압을 발생시킨다. THz 신호의 측정은 사실 THz 펄스와 게이트 광 레이저가 동시에 도달함으로서 검출기에 유도되는 광전류의 측정이다. 검출기 반도체의 전도도 σ_d 가 THz파가 도착한 순간의 즉각적인 값이 아니므로 시간 t_p 에 검출기에 도달한 THz 피크 전계에 의해 유도되어 흐르는 광전류 j 는 실제로 방사된 전계와 시간 t_p 후의 검출기의 전도도의 중첩적분(convolution)으로 나타나게 된다[10].

$$j(t_p) = \int_p^{\infty} E_{THz}(t')\sigma_d(t'-t_p)dt' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

시간적으로 변화하는 검출기의 전도도 σ_d 는 광 빔의 세기에 선형적으로 비례하여 증가할 것이므로 검출기에서의 광전류는 검출용 레이저의 출력에 따라 증가할 것이다. 그림 11에 펌프 광의 출력이 10 mW 일 때 검출 레이저 광 세기에 따른 THz 전계의 변화를 보인다. 이미터 안테나의 경우와 마찬가지로 20 mW 이상에서 THz 신호의 포화가 관찰되었다.

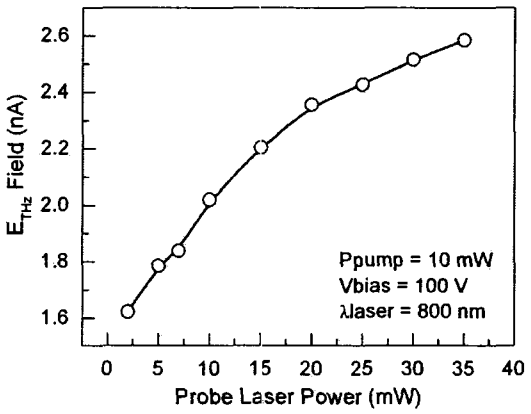


그림 11 THz 전계 세기의 검출 레이저 출력 의존성

Fig. 11 Dependency of THz electric field intensity with probe laser power

3.4공기중습도의영향

물분자는 THz 스펙트럼 영역에서 많은 흡수대를 가지고 있어서 THz파는 미량의 수분에도 매우 민감하게 반응한다[11]. 따라서 수증기가 많이 포함된 높은 습도의 대기중에서 THz파는 강한 흡수를 보이므로 THz 파를 이용한 원거리의 통신에 많은 제약이 따르게 된다. 그림 12에 대기중 습도에 대한 THz파의 감쇄와 흡수선을 보인다. 습도는 건조공기(dry air)를 이용하여 THz파의 전파 광로에 불어넣어 조절하였다. 습도가 높을 때 (점선) THz 신호는 약간의 감쇄와 지연이 일어나며 점선의 타원으로 표시한 부분에서 알 수 있는 바와 같이 주기성의 미약한 신호가 주 피크선 이후에 계속 이어지는 것을 알 수 있다. 이러한 미약한 신호는 주파수 영역에서 흡수선으로 나타나게 된다. 본 실험에서 얻은 주파수 영역에서의 흡수대(선)는 타 문헌[11]에서 보고된 흡수선과 잘 일치하여, 파형과 스펙트럼이 정확히 측정되었음을 알 수 있다.

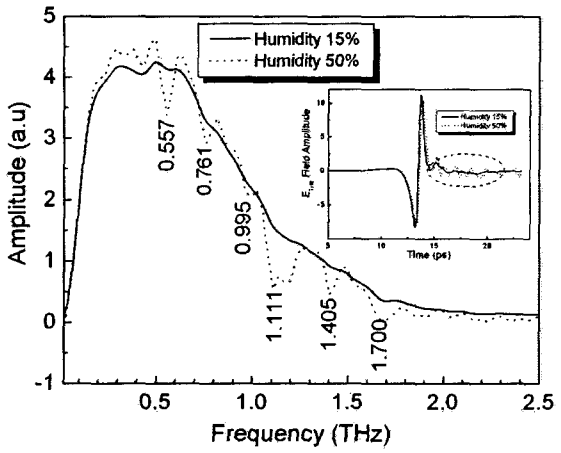


그림 12 대기중 수분의 영향(점선 아래의 숫자는 물분자의 흡수 주파수임)

Fig. 12 Influence of humidity of air (numbers under dashed line represent absorption line of water molecule)

성을 알아보기 위하여 그림 13 (a)에 보이는 바와 같은 살아있는 클로버 잎에 대한 T-Ray 영상 실험을 시도하였다. 시료 잎의 크기는 가로 세로 각각 2 cm 정도이며, 얇은 비닐지 사이에 끼어 고정하고 이미징을 위하여 시료를 X-Y 스테이지에 고정하여 1 mm 간격으로 스캔하였다. 그림 (b)는 펄스의 피크-피크 값의 차를 이용하여 영상화 한 것이며, 그림 (c)는 그림 (b)를 화상처리하여 배경의 잡음을 제거하고 평활화(smoothing)를 통하여 좀더 실제의 모습에 근접하도록 한 것이다. 그림 (d)는 테라헤르츠 펄스의 피크점의 지연시간을 기준으로 하여 영상화 한 것이다. 그림 (c)와 (d)에서 클로버 잎의 각 부분에서의 수분의 차에 따른 명암이 확실히 드러남을 알 수 있다. 또한 줄기의 아래 부분에 시료를 고정하게 위하여 붙인 셀로판테이프의 형상도 뚜렷하게 드러남을 알 수 있다. 이 실험을 통하여 본 시스템의 다양한 생체에 대한 영상 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

광전도 안테나 방식으로 초광대역의 테라헤르츠 펄스가 성공적으로 발생되고 검출되었다. 발생된 테라헤르츠파 스펙트럼의 주파수는 0.1 THz 로부터 약 3 THz 까지 얻어졌으며 0.3 - 0.5 THz 부근에서 최대치를 보이고 스펙트럼의 반폭치(FWHM)는 1 THz가 얻어졌다. 안테나의 바이어스 전압, 펌프 및 검출 레이저 출력, 펌프 레이저 파장에 따른 THz 전계의 변화 특성이 조사되었고, 이론적으로 예측된 결과들과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. THz의 전계는 이미터 안테나의 바이어스 전압에 선형적으로 비례하여 증가하였고 240 V 이상의 바이어스 전압(전계 12 kV/cm) 에서 안테나의 손상이 관찰되었다. THz 신호는 낮은 펌프 및 검출 레이저 출력에서는 선형적으로 증가하였으나 높은 레이저 출력에서는 광 캐리어에 의한 차폐효과로 포화하는 경향성을 보였다. 또한 펌프 레이저의 광자에너지가 반도체 갭 에너지 이하가 되면 급격히 THz 신호가 감소하며 THz파의 주파수 스펙트럼도 저주파수 대역으로 옮겨감을 알 수 있었다. 대기중에서 THz 파가 전파될 때의 THz파의 흡수특성은 본 실험에서 얻은 파형 및 주파수가 올바르게 측정되었음을 입증하였다. 또한 클로버 잎을 시료로 한 영상 실험을 통하여 잎 내부의 미소한 수분 차이를 이용한 T-Ray 이미지를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통하여 개발된 테라헤르츠파 발생 및 검출시스템은 각종 물질의 원적외선 영역에서의 광학적 특성을 파악할 수 있는 분광법과 THz파의 투과 특성을 이용한 T-Ray 이미징 시스템에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

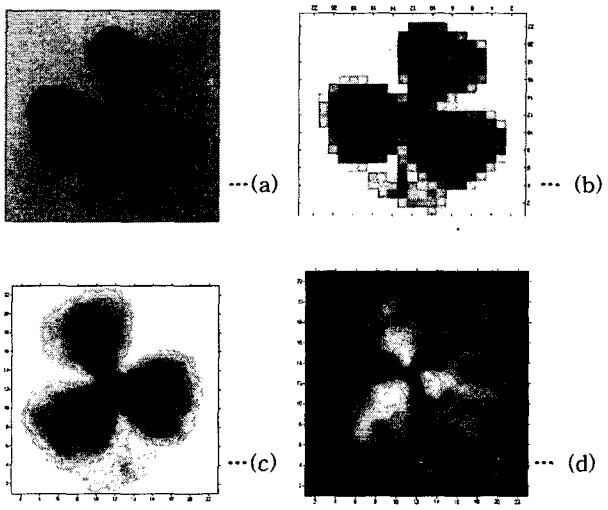


그림 13 클로바 잎의 T-Ray 영상 (a) 광학사진, (b) 피크-피크 차이를 이용한 이미지, (c) (b)를 화상처리한 그림, (d) 피크점의 시간 지연을 이용한 이미지

Fig. 13 T-ray image of a living clover leaf (a)optical image, (b)peak-to-peak image, (c) processed image of (b), (d) peak position image

감사의글

광전도 안테나의 제작에 큰 도움을 주신 포항공과대학의 한해욱 교수님과 동 대학 박사과정에 재학중인 박홍규씨에게 이 자리를 빌려 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

[1] N. Katzenenbogen and D. Grischkowsky, "An Ultra-Wideband Optoelectronic THz beam System", Ultra-Wideband, Shrt-Pulse Electromagnetics, Ed. H. Bertoni et al., Plenum Press, pp. 7-20, 1993

[2] L. Duvillaret, F. Garet, and J. J. Coutaz : "A Reliable Method for Extraction of Material Parameters in Terahertz Time-Domain Spectroscopy," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., 2, pp.739-746, 1996

[3] 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, pp. 1085-1094, 1999

[4] S. Gupta, M.Y. Frankel, J. A. Valdmanis, J. F. itaker,

G.A.Mourou, F. W. Smith and A.R. Calawa : "Subpicosecond carrier lifetimein GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures", Appl. Phys. Lett. **59**, pp. 3276-3278, 1991

[5] D.C.Look : "Molecular beam epitaxial GaAs grown at low temperature", Thin Solid Films **231**, pp. 61-73, 1993

[6] D. Dragoman and M. Dragoman : "Terahertz field and applications", Progress in Quantum Electronics **28**, pp. 1-66, 2002

[7] J. V. Rudd and D.M.Mittleman, "Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy", J. Opt. Soc. Am. B vol. **19** pp.319-329, 2002

[8] M.Tany, S.Matsuura, K.Sakai, and S.Nakashima : "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs", Appl. Optics **36**, pp. 853-7859, 1997

[9] Stephen E. Ralph and D. Grischkowsky, "Trap-enhanced electric fields in semi-insulators : The role of electrical and optical carrier injection", Appl. Phys. Lett. **59**, pp.1972-1974,1991

[10] P. K. Benicewicz, J. P. Roberts, and A.J. Taylor : "Scaling of terahertz radiation from large-aperture biased photoconductors", J. Opt. Soc. Am., B, **11**, pp. 2533-2546, 1994

[11] M.V.Exter, C. Fattinger and D. Grischkowsky, "Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor", Opt. Lett. **14**, pp. 1128-1130, 1989

저 자 소 개

진 윤 식 (陳 潤 植)

1963년 4월 17일생. 1986년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 1990년 동대학원 졸업(석사). 1999년 나가사키 대학 대학원 졸업(공박). 1990년 9월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 책임연구원. 고에너지 전자장기술 팀장

Tel : 055-280-1458, Fax : 055-280-1490

E-mail : ysjin@keri.re.kr

김 근 주 (宋 基 東)

1975년 12월 22일생. 2001년 한국해양대 전기공학과 졸업. 2003년 한국해양대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 전기물리연구그룹 연구원

Tel : 055-280-1467, Fax : 055-280-1490

E-mail : kikimanse@lycos.co.kr

손 채 화 (孫 采 化)

1967년 12월 15일생. 1991년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업(학사). 1996년 포항공대 물리학과 대학원 졸업(석사). 2001년 동대학원 졸업(이박). 2001년 3월~11월 포항공대 박사후 연구원. 2001년 11월~2003년11월 게이오대학 연구원. 2003년 11월~현재 한국전기연구원 전기물리연구그룹 선임연구원.

Tel : (055) 280-1490, Fax : (055) 280-1419

E-mail : chshon@keri.re.kr

정 순 신 (鄭 淳 信)

1974년 3월 12일생. 1997년 서울대 물리교육과 졸업. 1999년 동대학원 과학교육과 졸업(석사). 2002년 2월 동대학원 물리학부 졸업(이박). 2001년 9월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1493, Fax : 055-280-1490

E-mail : ssjung@keri.re.kr

김 지 현 (金 志 炫)

1973년 10월 17일생. 1996년 포항공대 화학과 졸업(학사). 1998년 동대학 물리학과 대학원 졸업(석사). 2002년 1월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 연구원.

Tel : (055) 280-1531, Fax : (055) 280-1490

E-mail : jhkim@keri.re.kr

전 석 기 (全 錫 基)

1972년 6월 12일생. 1998년 서울대 사대 물리교육과 졸업(학사). 2001년 서울대 자연대 물리학부 대학원 졸업(석사). 2005년 동대학원졸업(박사). 2005년 1월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 선임연구원.

Tel : (055) 280-1415, Fax : (055) 280-1490

E-mail : sgjeon72@keri.re.kr