

# 전압 변화에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 변화 특성

전 태 인, 김 근 주\*

한국해양대학교 전기전자공학부

## The Characteristics of Terahertz Electromagnetic Pulses

by Different Bias Voltage

Tae-In. Jeon , Keun-Ju. Kim\*

Division of Electrical and Electronics Engineering

Korea Maritime University

E-mail : jeon@hanara.kmaritime.ac.kr

### 요 약

본 연구는 DC 전압에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 변화를 측정하였다. 펨토초(femto-second)로 여기 되는 레이저 펄스를 transmitter chip에 입사시키고, 두 개의 transmission line에 DC 전압을 최소 5 Volt에서 최대 90 Volt 까지 변화시켜 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기와 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 전압이 증가될수록 상대적으로 스펙트럼의 크기가 고주파 쪽으로 증가되었으며, 신호 대 잡음비(SNR) 역시 250:1에서 10,000:1로 개선 할 수 있음을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

We have measured terahertz electromagnetic pulses when DC voltage from 5V up to 90V is applied to the transmitter chip excited by femto-second laser pulse. The femto-second excitation laser pulse is injected to transmitter chip. Finally, we are observed the amplitude of electromagnetic pulse and variation of spectrum. Consequently, the amplitude of spectrum was increased to high frequency according to increase of voltage. At that time, the signal-to-noise rate(SNR) is increased from 250:1 to 10,000:1.

### 1. 서 론

테라헤르츠(THz) 전자기파는 스펙트럼 분포 상 마이크로파와 광파의 중간에 위치하며 파장으로는 0.3[mm], 에너지는 4[meV]로 극 적외선영역에 해당한다. Photoconductive 방법에 의한 테라헤르츠 전자기파의 발생과 검출이 개발된[1-2] 이래 이를 이용하여 기존의 GHz나 IR 영역에서 분석이 불가능했던 반도체, 광학적 결정체, 그리고 전도성 폴리머 등에 여러 물질의 특성 분석에 활용되어 왔다[3-6]. 이러한 특성 분석은 THz 시간 영역 분광법(THz time-domain spectroscopy: THz-TDS)에 의한 것으로 THz-TDS 분석에서의 신호 대 잡음비(Signal to noise Rate: SNR)의 향상은 분석의 정확도를 높이는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 크게 SNR을 높이는 방법으로 잡음(noise)을 줄이거나 신호(signal)를 크게 하는 두 가지 방법이 있다. 잡음을 줄이는 방법으로는 테

라헤르츠 펄스를 수십 회 측정한 후 그 평균을 구하여 신호 대 잡음비(SNR)를 높일 수 있지만 많은 시간과 안정된 시스템이 필수적으로 요구된다[5]. 따라서, 신호를 크게 하는 방법이 더 효율적이다. 기존에 고주파 영역의 테라파헤르츠 전자기파의 발생과 검출을 위해 많은 방법이 사용되었다. 레이저의 power를 조절하거나 두개의 transmission line에 입사되는 여기(excitation) 레이저 펄스를 양극(anode) 근처에 입사시켜 높은 테라파를 발생하거나 또는 receiver chip으로 길이가 짧은 dipole 안테나를 이용하여 테라파의 검출하는 방법 여러 방법이 시도되었다[1-2]. 하지만, 본 연구에서는 transmitter chip에 공급되는 전압과 이에 따른 신호 대 잡음비(SNR) 및 스펙트럼의 상관관계를 실험적으로 분석하였다.

본 연구의 결과는 transmitter chip에 공급되는 전압과 테라헤르츠 펄스 진폭의 상관관계로 테라헤르츠를 이용한 진폭 변조(amplitude modulation) 방식의 유선 및 무선 통신에 직접 적용할 수 있으리라 생각된다. 테라헤르츠 펄스의 진폭을 변

조하기 위해 입사되는 펨토초(femtosecond) 레이저의 세기를 조절하는 것보다 transmitter chip에 공급되는 전압을 조절함으로써 기존의 통신 변조방식의 전기적 장비를 직접 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다.

현재 유무선 통신에 있어서 그 스펙트럼의 대역폭이 좁아 더 많은 정보를 전달하기 위해 높은 영역의 스펙트럼쪽으로 이동하는 것과 같이 테라헤르츠의 높은 스펙트럼도 향후 개발될 테라헤르츠 통신에서 중요한 의미를 갖고 있다고 할 수 있다.

### II. 실험 장치

Fig. 1. (a)는 테라헤르츠 시간 영역 분광법의 전체 시스템 구성도이다. 테라헤르츠(THz) 전자기파의 발생(generation)과 검출(detection)을 위해 diode laser pumping에 의한 Ti:sapphire 펄스 레이저를 이용하였다. 사용된 레이저는 83[fs]의 펄스와 820[nm]의 파장, 86[MHz]의 반복률(repetition rate)를 가지고 있다. 그리고, transmitter chip과 receiver chip에 각각 14[mW]의 레이저 power를 공급하였다. Transmitter chip으로부터 발생한 테라파는 Fig. 1. (b)와 같이 두 개의 paraboloidal mirror를 통하여 receiver chip으로 입사된다. 전체 THz system은 공기중의 수분에 의한 THz 영향을[1] 최소화하기 위해 전 system을 airtight dry box에 넣고 dry air를 실험도중 계속하여 공급하였다. 사용된 transmitter chip은 GaAs로 이루어져 있으며, Fig. 2의 좌측 그림과 같이 80 [ $\mu$ m]의 간격과, 10 [ $\mu$ m]의 폭을 가진 두 개의 전송 라인(transmission line)으로 구성되어 있다. DC 전압이 인가된 전송 라인 사이에 펨토초로 여기되는 레이저 펄스를 입사시켜 THz를 발생하였다[1]. 레이저 펄스 입사시 전기장의 세기가 가장 큰 양(positive)의 전압이 인가된 전송 라인의 anode 끝 부분에 그림과 같이 여기 레이저 펄스를 입사시켜 진폭이 최대인 테라헤르츠 전자기 펄스를 발생시켰다. 그리고, silicon on sapphire (SOS)로 이루어진 receiver chip은 그림 2의 우측과 같이 10 [ $\mu$ m]의 간격과 5 [ $\mu$ m]의 폭을 가진 dipole antenna로 이루어졌다. 검출(detection) 레이저 펄스를 dipole antenna의 gap에 입사시켜 photoconductive switch 방법에 의해 테라파를 검출하였다[1].

### III. 측정 및 결과

고 주파수 영역의 테라헤르츠 발생을 위해 여기 레이저 펄스를 전송 라인의 양극(anode) 끝 부분에 입사시

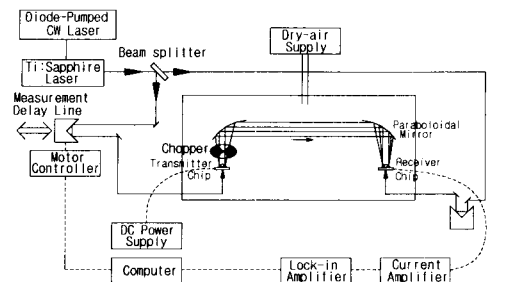


Fig. 1. (a) THz time-domain spectroscopy setup.

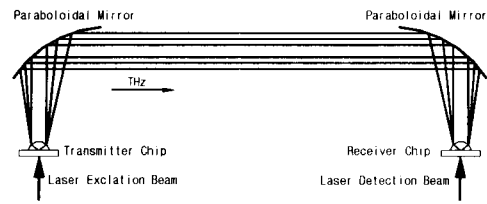


Fig. 1. (b) The optoelectronic THz beam system.

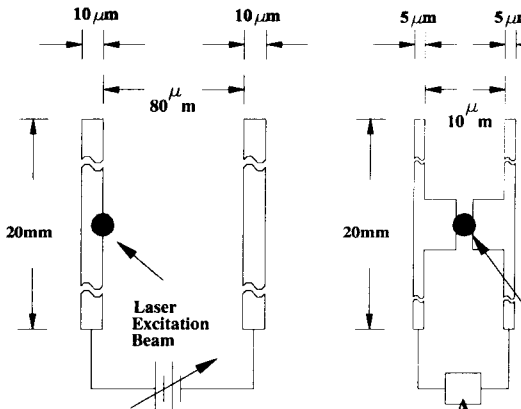


Fig. 2 Configuration of transmission line(left) and receiving antenna geometry(right).

켰다. Metal-semi-insulator-metal(M/SI/M)의 구조로 되어 있는 transmitter chip에서 anode 근처에서 매우 높은 field 분포를 가지는데 이는 geometric effect와 깊은 trap에 의한 억셉터(acceptor)의 점유 증가로 인한 trap-enhanced field(TEF)의 증가가 그 원인이다. 일반적으로 전체 potential의 90% 이상이 anode 근처 ~수 [ $\mu$ m]안에 존재한다[7]. 이미 레이저 펄스에 의해 반도체내에서 발생된 광 운반자(photo carrier)에 관한 활발한 연구가 이루어져 왔다[8]. 테라헤르츠 전자기파를 발생하

는 transmitter chip의 두 전송 라인(transmission line)에 5[V]에서 +5[V]씩 증가하여 90[V]까지 전압을 공급하였다. 이는 두 전송 라인 사이에 평균 625[V/cm]에서 11,250[V/cm]의 전기장의 변화에 해당된다. 실제 anode의 끝 부분의 1[ $\mu$ m] 이내에 여기 레이저 펄스가 입사된다. 이때 발생된 테라헤르츠 펄스의 크기가 최소 48pA에서 최대 2,138 pA까지 증가되었다.

Fig. 3. (a)는 전압 상승에 대해 각각의 경우 발생된 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기다. 전압이 증가함에 따라 펄스의 크기가 비선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 각 펄스는 모두 같은 시간에 발생되나 비선형성을 확인하기 위하여 각각의 펄스를 일정한 시간간격을 두고 그래프를 그렸다. 그림에서 알 수 있듯이 전압이 증가할수록 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기가 증가함을 알 수 있다. 또한, 전압이 상승할수록 pulse의 폭이 좁아짐과 동시에 끝이 더 뾰족(sharp)해짐을 알 수 있는데 이는 높은 주파수 영역으로 이동함을 의미한다. Fig. 3. (b)는 Fig. 3. (a)에서 각각의 테라헤르츠 pulse에 대한 최대값과 최소값의 차이이다. 5V의 전압을 인가하였을 때 나타난 테라헤르츠 전자기 펄스의 신호 대 잡음비(SNR)는 250:1이었으나, 90V 전압을 인가하였을 때는 10,000:1로 40배 증가되었다. 이는 전압의 증가에 의한 background 잡음 증가치 보다 테라파의 신호 증가치가 더 크다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

Fig. 4. (a)는 각각의 펄스에 대한 스펙트럼의 상대적 크기를 나타내고 있다. 바이어스 전압이 증가할수록 스펙트럼의 크기도 증가함을 알 수 있는데 높은 전압에서 더 큰 에너지 양을 가짐을 알 수 있다. Fig. 4. (b)는 전압에 따른 주파수의 분포를 나타내고 있다. 고전압을 인가했을 때 나타난 펄스의 스펙트럼이 저전압을 인가하였을 때 보다 상대적으로 높은 주파수 쪽으로 이동되었음

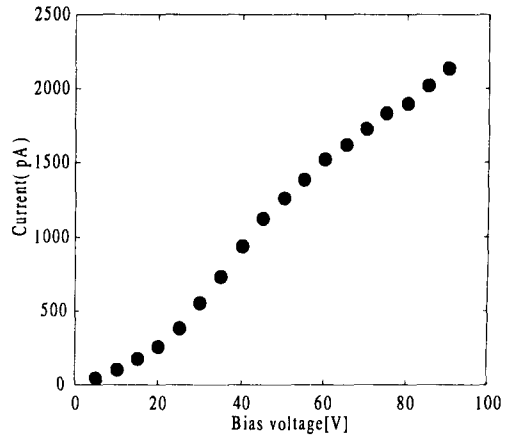


Fig. 3. (b) The relative magnitude of each THz electromagnetic pulses.

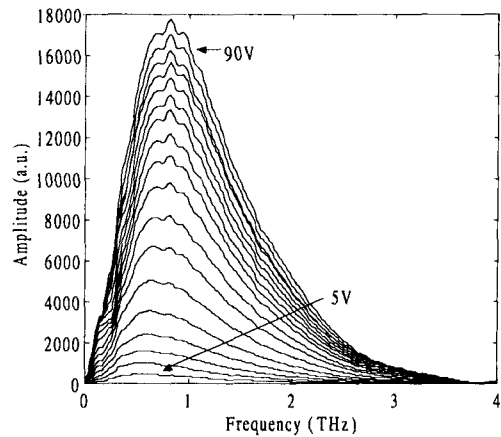


Fig. 4. (a) The amplitude spectra of THz electromagnetic pulses.

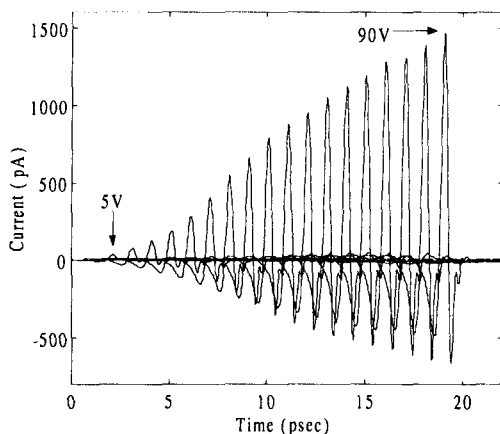


Fig. 3. (a) The magnitude of THz electromagnetic pulses.

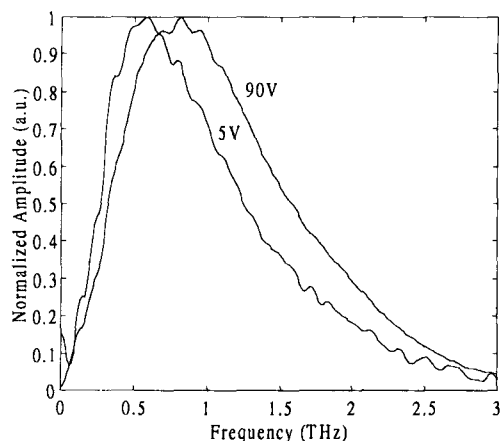


Fig. 4. (b) Compare two THz spectra.

을 알 수 있다. 2 THz의 주파수에서 90V의 전압

을 인가했을 때 5V의 전압을 인가했을 때 보다 1.6배의 스펙트럼 크기가 증가되었다. 이는 높은 전기장내를 발생된 광 운반자(photo-carrier)들이 상대적으로 빨리 가속되어 폭이 좁은 테라헤르츠 전자기 펄스가 발생되었을 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구를 통하여 transmitter chip에 공급되는 전압과 테라헤르츠 전자기 펄스의 진폭과의 상관관계를 정량적으로 분석할 수 있었다. 전압이 증가될수록 신호 대 잡음비가 개선되었으며 또한 스펙트럼도 고주파 쪽으로 이동되었음을 확인할 수 있었다. 90V 이상의 전압을 인가했을 때 두 transmission line에 대량의 전류가 흘러 전송 라인이 파괴되어 더 이상의 전압공급이 불가능하였다. 이와 같은 한계전압은 chip의 종류와 전송 라인의 구조에 따라 결정되므로 이를 잘 고려하여 chip을 설계하면 더 높은 전압에 더 큰 진폭을 가진 고주파영역의 신호 대 잡음비가 향상된 테라헤르츠 전자기파를 발생할 수 있다고 생각된다. 본 실험 결과를 이용하여 테라헤르츠 진폭변조 통신에 사용하면 더 많은 정보를 전송할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초 연구지원사업으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] D. Grischkowsky, Soren Keiding, Martin van Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 7, pp2006-2015, 1990. 10.
- [2] A. S. Welling, B. B. Hu, N. M. Froberg, and D. H. Auston, "Generation of tunable narrow-band THz radiation from large aperture photoconducting antennas," Appl. Phys. Lett., Vol 64., pp137-139, 1994. 1
- [3] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of Conduction in Doped Silicon," Phys. Rev. Lett., Vol. 78, pp1106-1109, 1997.2.
- [4] G. Gallot, Jianguan Zhang, R. W. McGowan, Tae-In. Jeon, and D. Grischkowsky, "Measurements of the THz absorption and dispersion of ZnTe and their relevance to the electro-optic detection of THz radiation," Appl. Phys. Lett., Vol. 74., pp3450-3452, 1999. 6.
- [5] Tae-IN Jeon and D. Grischkowsky, "Characterization of optically dense, doped semiconductors by reflection THz time domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett., Vol. 72, pp3032-3034, 1998. 6.
- [6] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and Reghu Menon, "Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett., Vol. 77, pp2452-2454, 2000. 10.
- [7] Stephen E. Ralph and D. Grischkowsky, "Trap-enhanced electric fields in semi-insulators: The role of electrical and optical carrier injection," Appl. Phys. Lett., Vol. 59, pp 1972-1974, 1999. 8.
- [8] E. S. Harmon, M. L. Lovejoy, M. R. Melloch, and M. S. Lundstrom, "Experimental observation of a minority electron mobility enhancement in degenerately doped p-type GaAs," Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp536-538, 1993. 7.