

테라헤르츠 전자기 펄스의 반사특성을 이용한 굴절률 측정

전태인[†]

한국해양대학교 전기전자공학부

Ⓣ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

(2000년 8월 30일 받음, 2000년 12월 16일 수정본 받음)

테라헤르츠 레이더를 이용하여 알루미늄 거울 및 도체와 부도체로 이루어진 각각의 물질에 대한 테라헤르츠 전자기 펄스의 반사특성을 측정하였다. 알루미늄 거울로부터 반사된 테라헤르츠 펄스의 크기변화를 측정하기 위하여 최고 9회까지 테라파를 반사시켜 펄스의 크기에 대한 변화가 없음을 확인하였다. 또한 알루미늄 거울의 반사각도에 대한 테라파의 영향을 측정하였다. 알루미늄 거울에 대한 반사파를 reference로 하여 알루미늄 board, 순수실리콘, quartz, 그리고 LDPE에 대한 테라파의 반사를 측정하여 각각의 물질에 대한 테라헤르츠 영역의 반사계수와 굴절률을 측정하였다. 이러한 측정법은 sample의 두께에 무관한 비접촉 테라헤르츠 분석법의 적용이라 할 수 있다.

Keywords : SM.030, SM.020.

I. 서 론

테라헤르츠(THz) 전자기파는 스펙트럼 분포 상 마이크로파와 광파의 중간에 위치하며 파장으로는 0.3 mm, 에너지로는 4 meV에 해당하는 극 적외선영역이다. 이러한 THz 전자기파는 물질에 따라서 투과성과 반사성의 성질을 지닌 이중적 성질을 띠고 있다. 1950년대에 와서 반사에 의한 GHz 이하의 전자기 파에 대한 산란 특성이 연구되었으며,^[1,2] 최근 들어 테라헤르츠 투과에 의한 시간영역 분석법(THz Time-Domain Spectroscopy : THz-TDS)으로 반도체와 crystal 등 여러 물질에 대한 특성 연구가 활발히 이루어져 왔다.^[3-5] 하지만 본 연구에서는 THz의 반사성질을 이용하여 기존의 레이더 주파수 보다 훨씬 높은 THz 영역의 레이더 system을 실험실 내에서 제작하여 THz의 반사특성을 측정하여 반사에 의한 THz-TDS를 연구하였다. 일반적으로 알루미늄 거울을 사용하여 THz-TDS의 reference THz 펄스로 사용하였으나,^[6] 이러한 알루미늄의 반사율에 대한 정확한 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에는 최대 9회까지 테라파를 알루미늄 거울에 반사시켜 거의 100%의 반사율을 가진다는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 알루미늄 거울의 반사각도 변화에 따른 테라파의 변화를 측정하여 반사 THz-TDS에 그 영향을 최소화하는 방법을 제시하였다. 이러한 알루미늄 반사를 reference로 하여 알루미늄 board, 순수실리콘, quartz, 그리고 low density polyethylene(LDPE)에 대한 반사계수와 굴절률을 측정하였다. 본 실험 결과는 앞으로 개발 될 THz 통신의 귀중한 기초 자료가 될 것으로 생각된다.

II. THz 반사 실험장치

THz 전자기파의 발생과 검출은 diode laser pumping에 의

한 Ti:sapphire pulse laser에 의해 이루어지는데, 사용된 Ti:sapphire laser는 70 fs의 pulse를 가지고 820 nm의 파장, 15 mW의 power와 86 MHz의 repetition rate를 가지고 있다. GaAs로 이루어진 transmitter chip은 80 μ m의 간격과, 10 μ m의 폭을 가진 두 개의 transmission line으로 구성되어 있고, 80 V의 positive 전압이 인가된 transmission line에 laser pulse를 입사시켜 THz를 발생하였다.^[7] 그리고 silicon on sapphire (SOS)로 이루어진 receiver chip은 10 μ m의 간격과 5 μ m의 폭을 가진 dipole antenna로 이루어 졌으며 laser pulse의 구동으로 photoconductive switch에 의해 테라파를 검출하였다.^[7]

기존의 투과에 의한 THz-TDS system에서 두 개의 paraboloidal 거울 사이에 두 개의 deflecting 거울을 삽입시켜 그림 1과 같이 반사 THz-TDS system을 구성하였다. 이때 target 거울로 입사되는 테라파의 입사각은 24.5°이고 테라파는 그림의 표면을 따라 편광 되어있다. 반사 THz-TDS system은 공기중의 수분에 의한 THz 영향을^[7] 최소화하기 위해 전 system을 airtight dry box에 넣고 dry air를 실험도중

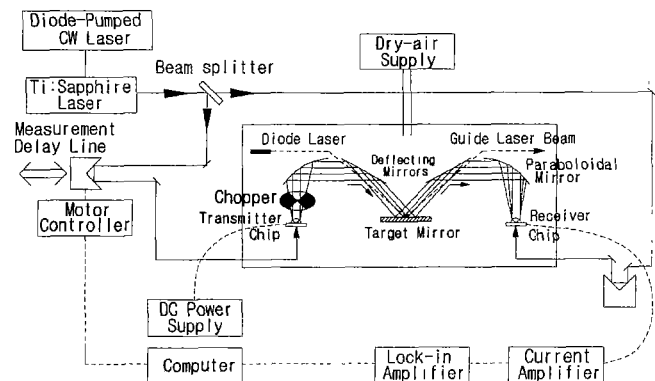


그림 1. 반사 THz-TDS system의 구성도.

[†]E-mail: jeon@hanara.kmaritime.ac.kr

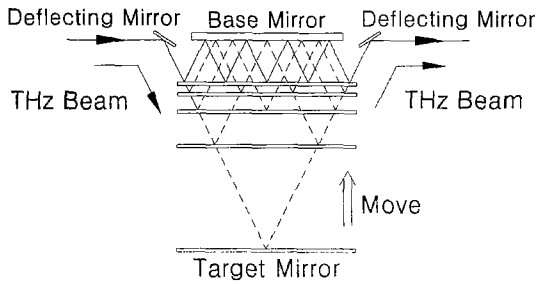


그림 2. Target 거울의 이동에 의한 THz 다중반사의 개략도.

계속하여 공급하였다. 반사된 테라파의 펄스크기를 측정하기 위해 알루미늄 거울인 target 거울과 base 거울을 두 개의 deflecting 거울 사이에 그림 2와 같이 위치 시켰다. 이때 반사횟수를 증가시키기 위해 target 거울을 base 거울로 이동시켜 반사횟수를 1, 3, 5, 7, 9회까지 증가 시켰다. 또한 각 sample에 대한 반사계수와 굴절률을 측정하기 위해 그림 1의 target 거울 위치에 sample을 위치시키고 테라파를 표면에 반사 시켰다. 알루미늄 거울 반사와 sample 반사 측정에서 각 물체의 동일한 각도와 거리를 유지하기 위해 diode laser를 사용하여 알루미늄 거울과 sample holder에 반사된 guide laser beam을 확인함으로써 이를 유지시켰다.

III. 실험 및 결과

3.1. 알루미늄 거울에 의한 반사파 측정

알루미늄 거울인 target 거울과 base 거울에 최대 9회까지 다중 반사된 테라파가 그림 3에 나타나 있다. 두 개의 THz 펄스사이의 최대 시간차는 ± 30 fsec로 측정되었는데 이는 이동하는 target 거울이 최대 $\pm 5 \mu\text{m}$ 까지 위치가 변화되었다고 할 수 있다. 이러한 편차는 투과에 의한 THz-TDS 측정에서 sample의 두께에 의한 편차 보다 작은 값이다.^[3,4] 0.1 THz에서 2.0 THz 사이의 측정된 반사 테라파의 spectrum 크기차이는 $\pm 1\%$ 이내이다. 반사횟수를 증가함에 따라 펄스의 spectrum 크기가 불규칙하게 증감을 하는데 이는 알루미늄 반사에 의한 손실보다 $\pm 5 \mu\text{m}$ 의 위치 이동에 의한 것이다. 이를 확인하기 위하여 측정된 테라파의 위상변화를 측정하였는

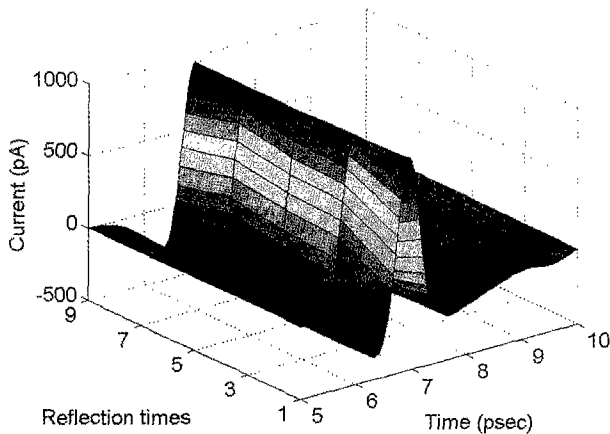


그림 3. 알루미늄 거울의 반사횟수에 따른 THz 펄스.

데 1 THz의 주파수 영역에서 ± 0.1 rad의 변화가 있었다. 이는 ± 33 fsec의 시간차에 해당되고, $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 직선거리에 해당된다. 따라서 알루미늄 거울에 의한 거리변화는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 가 된다. 따라서 본 실험을 통하여 알루미늄에 의한 테라파의 반사계수는 측정된 spectrum 범위 내에서 1로 간주할 수 있다.

3.2. 반사각도에 의한 테라파 측정

반사 THz-TDS 측정에서 target 거울과 sample의 표면에 반사된 테라파 측정에 가장 민감한 요소 중의 하나는 각도에 의한 변화이다. 이러한 변화를 측정하기 위해 target 거울을 $+2^\circ$ 에서 -2° 까지 0.5° 씩 변화시켜 측정된 THz 펄스가 그림 4(a)에 나타나 있다. target 거울에서 receiver chip까지의 거리는 35 cm이고 초점거리가 11.9 cm인 paraboloidal 거울과 높이가 6.46 mm이고 곡률 반지름이 5 mm인 silicon lens를 receiver chip 뒤에 부착하여 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 최초의 $\pm 0.5^\circ$ 에서 테라파의 크기가 50% 감소됨을 알 수 있다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 등고선 그림으로 각도가 증가할수록 테라파의 크기가 급격히 감소하고 $\pm 2^\circ$ 에서 테라파의 크기가 3%로 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 3.3의 sample 측정시 diode laser beam을 이용하여 수 mrad 범위 내의 위상에서 sample을 교체하여 반사파를 측정하였다.

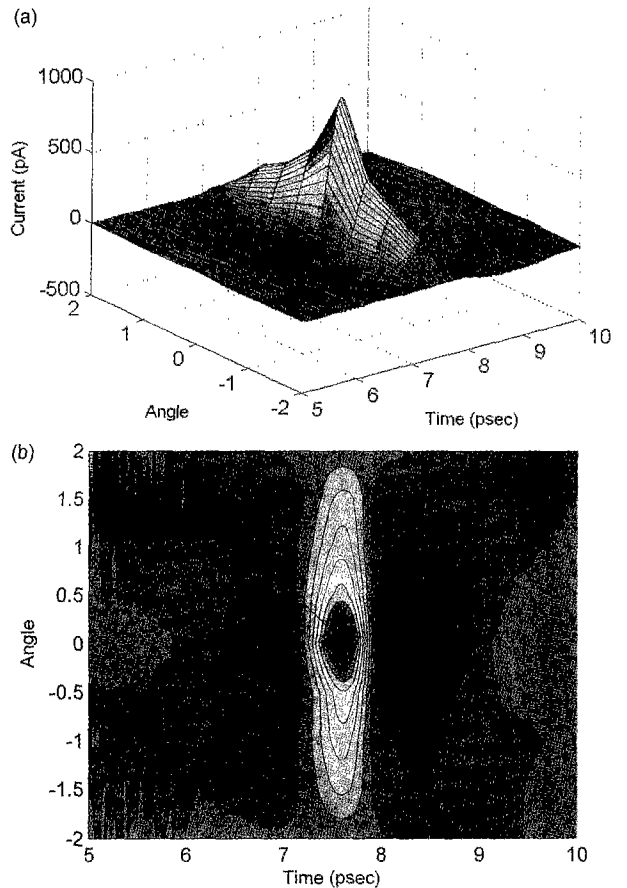


그림 4. (a) Target 거울의 각도에 따른 테라파의 크기. (b) 등고선 분포도.

3.3. 테라파 반사에 의한 sample의 측정

그림 1의 알루미늄 거울(target mirror)에 반사된 reference THz 펄스(E_r)와 알루미늄 거울 대신 알루미늄 board, 순수실리콘, quartz, 그리고 LDPE의 표면에 반사된 output THz 펄스(E_o)가 그림 5(a)에 나타나 있다. 그림 5(b)는 이들 펄스의 Fourier 변환된 spectra이다. sample에 의한 감쇄와 두 paraboloidal 사이가 총 70 cm에 달하여 두 paraboloidal 사이의 초점거리인 24 cm의 범위를 초과하였기 때문에 0.1 THz에서 1.6 THz 까지만 THz power가 충분히 존재하여 신뢰할 수 있는 결과를 가진다. 두 reference 펄스와 output 펄스로부터 각 sample에 대한 반사계수를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$R_{\perp} = \frac{E_r}{E_o} \quad (1)$$

이때 측정된 각 sample의 반사계수는 그림 6(a)에 나타나 있다. 각 sample에 대한 굴절률은 Fresnel 관계식에 의해 구할 수 있다.^[8]

$$R_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2)$$

여기서 $n_1 = 1$ (공기의 굴절률), n_2 는 sample의 굴절률, θ_1 은 입사각, 그리고 굴절각 θ_2 은 아래의 snell의 관계식으로부터

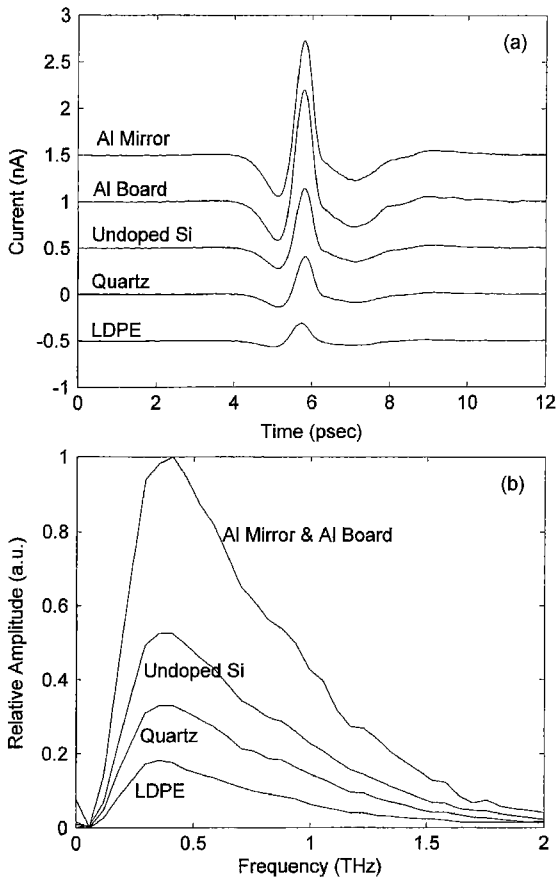


그림 5. (a) 여러가지 물질에 반사된 THz 펄스. (b) THz 펄스의 주파수 분포.

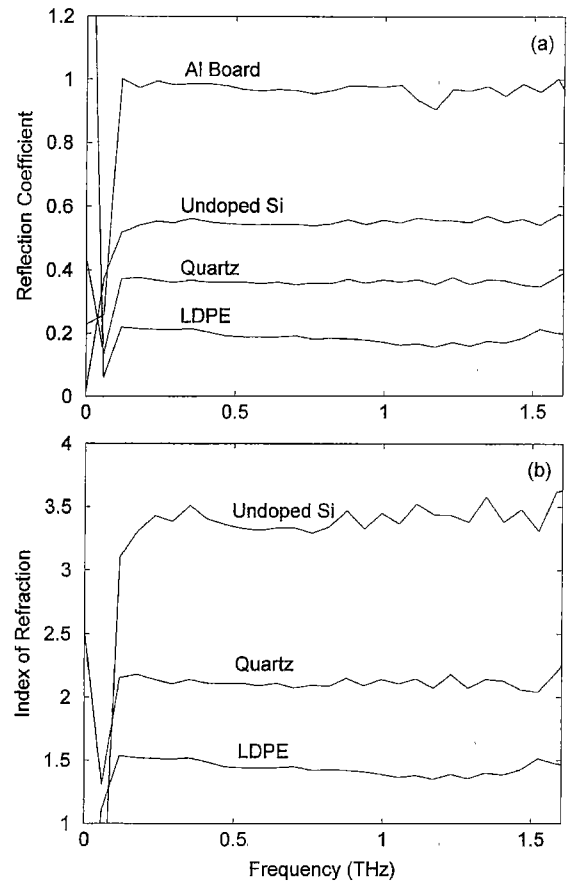


그림 6. (a) 측정된 반사계수. (b) 측정된 굴절률.

구할 수 있다.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right) \quad (3)$$

따라서 식 (2)의 유일한 알려지지 않은 parameter인 각 sample의 굴절률을 그림 6(b)와 같이 구할 수 있다. 금속인 알루미늄 board의 경우 반사계수가 거의 1의 값을 가지므로 본 측정으로 굴절률을 구할 수 없다. 하지만 측정된 순수실리콘, quartz, 그리고 LDPE의 굴절률은 각각 3.4, 2.1, 그리고 1.5 인데 이는 이전의 투과에 의한 THz-TDS의 측정법과 같은 결과임을 알 수 있다.^[7,9,10]

IV. 결 론

본 논문에서는 도체, 반도체, 부도체의 반사계수와 굴절률을 측정하기 위하여 THz 레이더에 의한 반사 THz-TDS system을 사용하였다. 반사에 의한 측정에서 reference 펄스에 해당하는 알루미늄 거울에 반사된 테라파와 각 sample의 표면에 반사된 테라파를 동일한 조건에서 측정하기 위해 위치와 각도에 대한 연구를 선행하였다. 이때 알루미늄 거울에 의한 테라파의 반사는 100%의 반사로 생각 할 수 있으며 투과에 의한 THz-TDS 측정시 발생하는 sample의 두께오차 보다 적은 $\pm 5 \mu\text{m}$ 범위 내에 target 거울을 목표지점까지 이동 할 수 있

었다. 또한 각도에 의한 영향은 아주 크게 나타났으나 본 연구에서는 guide laser beam을 사용하여 수 mrad 내로 위상을 극한 시킬 수 있었다. 따라서 이와 같은 기술을 이용하여 각 sample에 대한 반사 테라파를 측정하여 반사계수와 굴절률을 측정할 수 있었고 그 결과는 투과에 의한 THz-TDS 방법과 같은 결과를 도출 할 수 있었다.

본 연구는 sample의 두께에 무관한 비침투, 비파괴의 방법으로 sample의 광학적 전기적 특성을 연구할 수 있다는 가능성을 보여 주었다고 생각된다. 앞으로 THz의 주파수에 따라 그 특성이 변하는 sample에 대한 더 많은 연구가 있어야 할 것이라 판단된다. 또한 이러한 결과는 앞으로 개발될 THz 통신의 귀중한 기초 자료가 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 1999년도 국산연구기기활용 지원 과제 연구비로 수행되었으며, 본 연구에 조인을 주신 Oklahoma State University의 D. Grischkowsky 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

[1] E. M. Kennaugh and R. L. Cosgriff, *National Convention IRE Record* (1958), Pt. I.

[2] E. M. Kennaugh and D. L. Moffatt, *Proc. IEEE*, vol. 53, p. 893, 1965.
 [3] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of conduction in doped silicon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, pp. 1106-1108, 1997.
 [4] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, "Observation of a Cole-Davidson type complex conductivity in the limit of very low carrier densities in doped silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, pp. 2259-2261, 1998.
 [5] G. Gallot, J. 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, pp. 3450-3452, 1999.
 [6] R. W. McGowan, R. A. Cheville, and D. Grischkowsky, "Direct observation of the Gouy phase shift in THz impulse ranging," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp. 670-672, 2000.
 [7] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, pp. 2006-2015, 1990.
 [8] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley Pub. Co., 1990), Chapter 4.
 [9] J. W. Shackleton, *Trans. Am. Inst. Elec. Eng.*, vol. 64, p. 912, 1945.
 [10] A. Renfrew and P. Morgan, *Polythene* (Iliffe & Sons Ltd., second edition, 1960).

Index of refraction measurement using the reflection characteristics of terahertz electromagnetic pulses

Tae-In Jeon[†]

Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, KOREA

[†]E-mail: jeon@hanara.kmaritime.ac.kr

(Received August 30, 2000 ; Revised manuscript received December 16, 2000)

Via terahertz (THz) reflection radar, the characterizations of reflected THz electromagnetic pulses are reported. Quasi-optical techniques are used to efficiently reflect pulses of THz electromagnetic radiation from an aluminum mirror and several conducting and nonconducting materials. An incident THz pulse is reflected up to 9 times to know the magnitude change of a reflected pulse from the aluminum mirror. Using this method, aluminum board, undoped silicon, quartz, and LDPE samples' reflection coefficient and index of refraction can be measured. These results suggest a possible application of transient THz reflection spectroscopy without surface contact.

Keywords : SM.030, SM.020.