

## 전기적 광학적 변화가 테라헤르츠 전자기 필스의 모양에 미치는 영향

전태인<sup>†</sup>

한국해양대학교 전기전자공학부

④ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

(2001년 5월 2일 받음, 2001년 11월 14일 수정본 받음)

펩토초 레이저로 여기 되는 transmitter chip에 DC 전압을 최소 5 Volt에서 최대 90 Volt 까지 변화시켜 테라헤르츠 전자기 필스의 크기와 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 전압이 증가될수록 상대적 스펙트럼의 크기가 고주파 쪽으로 증가되었고 신호 대 잡음비 역시 250:1에서 10,000:1로 개선할 수 있었다. 이를 이용한 테라헤르츠 시스템의 재정렬로 테라헤르츠 스펙트럼을 최대 4 THz 까지 확장 할 수 있었다. 또한 dipole 안테나를 이용한 테라헤르츠 전자기 필스의 검출에서 입사되는 detection 레이저빔이 silicon on sapphire (SOS) receiver chip 뒤 표면에 반사되어 dipole 안테나로 입사될 때 두 개의 테라헤르츠 필스가 일정한 시간간격을 두고 동시에 발생됨을 알 수 있었다.

분류코드 : OC.010, SM.030.

### I. 서 론

Photoconductive 방법에 의한 테라헤르츠 발생과 검출이 개발된<sup>[1]</sup> 이래 이를 이용하여 기존의 GHz나 IR 영역에서 분석이 불가능한 반도체, 광학적 결정체, 그리고 전도성 폴리머 등에 대한 물질의 특성 분석에 활용되어 왔다.<sup>[2-5]</sup> 이러한 테라헤르츠를 이용한 특성 분석에서 신호 대 잡음비의 향상은 분석의 정확도를 높이는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 테라헤르츠 필스를 수십회 측정한 후 그 평균을 구하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있지만 많은 시간과 안정된 시스템이 필수적이다.<sup>[5]</sup> 과거 고주파영역의 테라헤르츠 필스를 검출하기 위하여 receiver chip에서 길이가 짧은 dipole 안테나를 이용하였다.<sup>[11]</sup> 하지만 본 연구에서는 transmitter chip에 공급되는 전압과 신호 대 잡음비 및 스펙트럼의 상관관계를 실험적으로 분석하였다.

Transmitter chip에 공급되는 전압과 테라헤르츠 필스 진폭의 상관관계는 테라헤르츠를 이용한 진폭변조 방식의 유선 및 무선통신에 직접 적용할 수 있으리라고 생각된다. 테라헤르츠 필스의 진폭을 변조하기 위해 입사되는 펩토초 레이저의 세기를 조절하는 것 보다 transmitter chip에 공급되는 전압을 조절함으로서 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 스펙트럼 쪽으로 이동하는 것과 같이 테라헤르츠의 높은 스펙트럼도 향후 개발될 테라헤르츠 통신에서 중요한 의미를 갖고 있다고 할 수 있다. 광학적 렌즈에 의한 레이저빔의 초점은 테라헤르츠 전자기 필스의 크기뿐만 아니라 스펙트럼에도 영향을 미친다고 할 수 있다. 본 연구에서는 최대의 테라헤르츠 스펙트럼을 구할

수 있는 방법을 제시하였다.

또한 dipole 안테나로 구성된 silicon on sapphire(SOS) receiver chip에서 레이저빔의 초점 정렬 방법에 따라 한 개 또는 두 개의 테라헤르츠 전자기 필스가 일정한 시간간격을 두고 발생됨을 확인하였다.

### II. 실험장치구성

THz 전자기 필스의 발생과 검출을 위해 diode laser pumping에 의한 Ti:sapphire 필스 레이저를 이용하였고, 사용된 레이저의 필스는 83 fs, 820 nm의 파장, 86 MHz의 반복률(repetition rate), 그리고 각 transmitter chip과 receiver chip에 14 mW의 레이저 power를 공급하였다. GaAs로 이루어진 transmitter chip은 그림 1(a)와 같이 80 μm의 간격과, 10 μm의 폭을 가진 두 개의 금속성 전송 라인(transmission line)으로 구성되어 있고, DC 전압이 인가된 전송라인에 레이저 필스를 입사시켜 THz를 발생하였다. 이러한 전송라인을 따라 전파되는 테라파의 특성에 관한 많은 연구가 이미 이루어져왔다.<sup>[6-8]</sup> Excitation 레이저 필스는 전기장의 세기가 가장 큰 양의 전압이 인가된 전송라인의 끝 부분에 그림과 같이 입사시켜 진폭이 최대인 테라헤르츠 전자기 필스를 발생시켰다. 그리고 SOS로 이루어진 receiver chip은 그림 1(b)와 같이 10 μm의 간격과 5 μm의 폭을 가진 dipole 안테나로 이루어 졌으며 excitation 레이저 필스를 dipole 안테나의 gap에 입사시켜 photoconductive switch 방식에 의해 테라파를 검출하였다.<sup>[1]</sup>

그림 1(c)는 사용된 THz 실험 장치로 6.46 mm의 높이와 5 mm의 반경, 그리고 8.9 mm의 및 지름을 가지 high-resistivity 단결정 실리콘으로 만든 렌즈를 각 chip의 뒷부분에 접촉시켰다. 이때 실리콘 렌즈와 chip 사이에서의 반사 손실을 줄이기 위해 실리콘 렌즈의 위 부분에 고무 링을 두고 약한 압력을 가하였다. 발생된 테라헤르츠 전자기파는 지름이 3"인 두 개

<sup>†</sup>E-mail: jeon@hanara.kmaritime.ac.kr

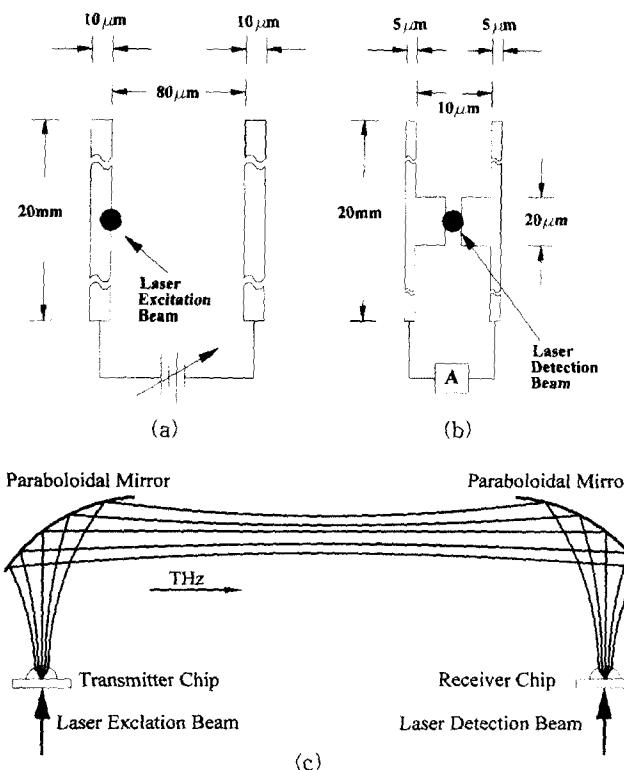


그림 1. (a) Transmitter chip의 구성도. (b) Receiver chip의 구성도. (c) 테라헤르츠 실험 장치의 개략도.

의 paraboloidal 거울을 통해 전파되고 두 paraboloidal 사이의 거리는 각 초점거리의 두 배인 23.8 cm를 유지시켰다. 전체 THz 시스템은 공기중의 수분에 의한 THz 영향을 최소화하기 위해 전 시스템을 airtight dry box에 넣고 dry air를 실험도중 계속하여 공급하였다.

### III. 실험 및 결과

#### 3.1. 전압에 따른 테라헤르츠 전자기 필스의 변화

반도체에 입사되는 레이저 필스는 광 운반자(photo-carrier)를 발생하고 발생된 광 운반자는 전기장에 의해 이동함으로 테라파가 발생된다. 따라서 발생된 테라파는 광 운반자와 전기장에 밀접한 관계가 있다.<sup>[9]</sup> 테라헤르츠 전자기파를 발생하는 transmitter chip의 두 전송 라인에 5 V에서 +5 V씩 증가하여 90 V의 전압을 각각 공급하였는데 이는 두 전송라인 사이에 625 V/cm에서 11,250 V/cm의 전기장의 변화에 해당된다. 이때 발생된 테라헤르츠 필스의 크기가 최소 48 pA에서 최대 2,138 pA까지 증가되었는데, 각각의 경우 발생된 테라헤르츠 전자기 필스의 크기가 그림 2(a)에 나타나 있고 전압이 증가함에 따라 필스의 크기가 비 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 각 필스는 모두 같은 시간에 발생되나 비 선형성을 확인하기 위하여 각각의 필스를 일정한 시간간격을 두고 그래프를 그렸다. 5 V의 전압을 인가하였을 때 나타난 테라헤르츠 전자기 필스의 신호 대 잡음비는 250:1이고 90 V 전압을 인가하였을 때 10,000:1로 40배 증가되었다. 이는 전압의 증가에 의한

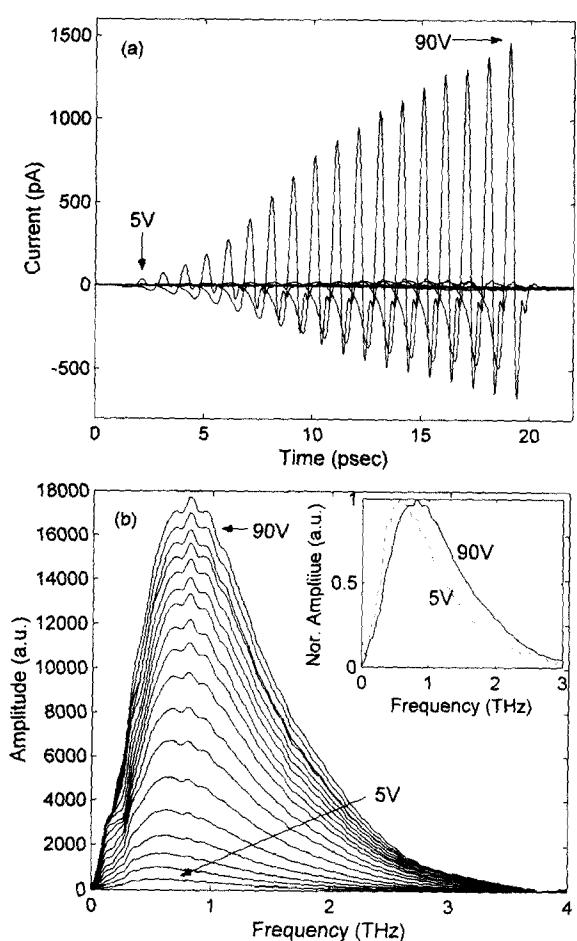


그림 2. (a) 전압변화에 따른 테라헤르츠 필스의 크기 변화. (b) 전압변화에 따른 테라헤르츠 필스의 스펙트럼 변화. 삽입된 그래프는 5 V와 90 V의 스펙트럼에 대한 normalized 된 크기 비교.

background 잡음 증가치 보다 테라파의 신호 증가치가 더 크다는 것을 간접적으로 알 수 있다. 또한 각각의 필스에 대한 스펙트럼의 변화가 그림 2(b)에 나타나 있다. 고전압을 인가했을 때 나타난 필스의 스펙트럼이 상대적으로 높은 주파수 쪽으로 이동되었음을 알 수 있다. 이때 5 V와 90 V에 대한 상대적인 스펙트럼의 변화가 그림 2(b)에 삽입되어 있다. 2 THz 주파수에서 90 V의 전압을 인가했을 때 5V의 전압을 인가했을 때 보다 1.6배의 스펙트럼 크기가 증가되었다. 이는 높은 전기장내를 발생된 광 운반자들이 상대적으로 빨리 가속되어 폭이 좁은 테라헤르츠 전자기 필스가 발생되었을 것으로 생각된다.

#### 3.2. 테라헤르츠 스펙트럼의 확장

테라파의 스펙트럼은 테라헤르츠 시스템의 정렬과 밀접한 관계가 있다. 특히 두 개의 paraboloidal 거울 사이의 거리가 confocus를 벗어나거나<sup>[10]</sup> 입사되는 excitation 레이저빔과 detection 레이저빔이 각각의 chip에 수직을 이루지 않으면 고주파 영역의 테라파가 상대적으로 손실되어 저주파 테라헤르츠 영역의 필스가 얻어지게된다. 그림 3(a)는 transmitter chip

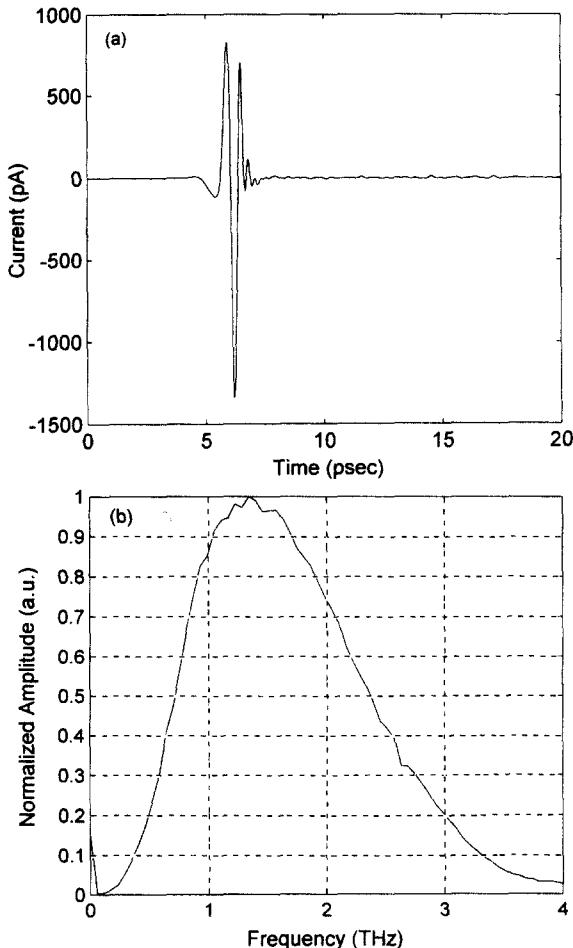


그림 3. (a) 넓은 주파수 대역폭을 가진 시간영역에서의 테라헤르츠 펄스. (b) (a)의 테라헤르츠 펄스에 대한 스펙트럼.

에 85V의 전압을 인가한 후 시간영역에서 발생된 테라헤르츠 펄스의 최소 부분을 맞춘 다음 음의 테라헤르츠 신호가 최대한 크게 되도록 다시 정렬을 하여 양의 최대 테라헤르츠 신호보다 더 크게 만들었다. 이는 시간영역에서 멜타함수 형태의 펄스가 스펙트럼 영역에서 폭이 넓은 스펙트럼에 해당됨을 이용하여 시스템을 재정렬을 하였다. 이때 주 테라헤르츠 펄스 이후에 갑작 진동하는 형태의 테라파가 나타났는데 이들도 모두 고주파 영역의 테라파라고 할 수 있다. 이를 펄스에 대한 스펙트럼이 그림 3(b)에 나타나 있는데, 그 최대값이 1.35 THz에 나타나고 3 THz에서도 최대값의 20%에 해당하는 크기를 가지고 있으며 최대 4 THz까지 스펙트럼이 확장되었음을 알 수 있다. 이는 그림 2(b)와 비교하면 주파수의 최댓값은 0.82 THz에서 1.35 THz로 이동되었으며, 3 THz 영역에서 주파수의 크기가 2.5배 증가되었다. 따라서 전체 주파수는 고주파 영역으로 스펙트럼이 확장되었음을 알 수 있다.

### 3.3. 두 테라헤르츠 펄스의 발생

GaAs transmitter chip과 SOS receiver chip을 이용하여 발생된 테라헤르츠 전자기 펄스가 그림 4(a)에 나타나 있다. 이때 레이저빔은 그림 4(a)에 삽입된 그림과 같이 광학 렌즈를 통

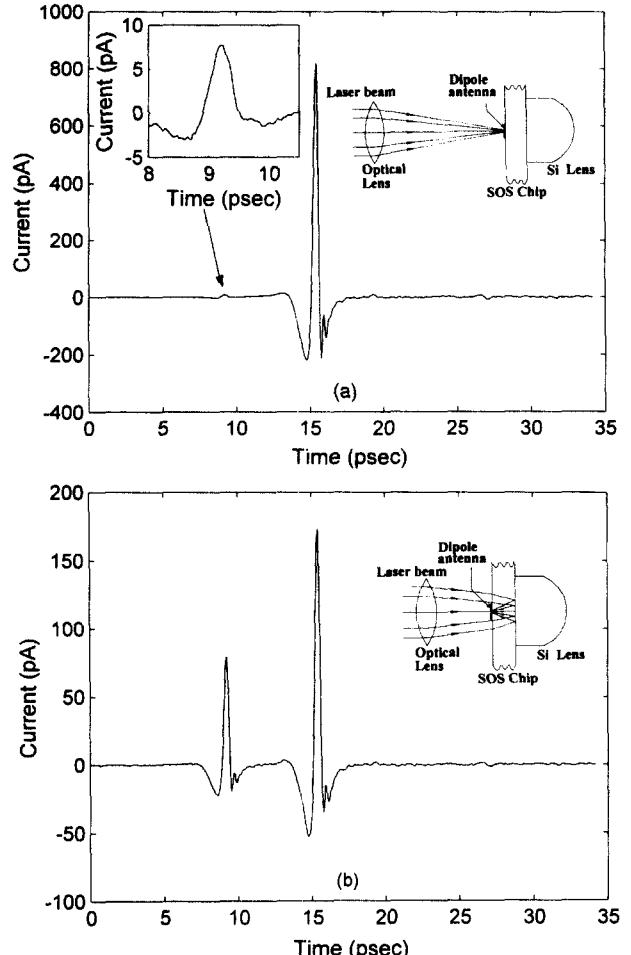


그림 4. (a) 레이저빔이 디아폴 안테나의 앞면에 입사될 때 테라헤르츠 펄스. (b) 레이저빔이 receiver chip의 뒷면에 반사되어 디아폴 안테나의 뒷면에 입사될 때 테라헤르츠 펄스.

여 dipole 안테나의 앞부분에 초점을 맞추었다. 주 펄스가 나타나기 전 6.2 psec 앞에서 주 펄스보다 1/100배 작은 펄스가 발생되었다. 이는 레이저빔의 일부가 SOS receiver chip을 투과한 후 chip의 뒤 표면에 반사된 다음 다시 dipole 안테나의 뒷부분으로 제 입사되어 생긴 테라파이다. 레이저빔이 chip의 뒤 표면에 반사되어 dipole 안테나로 입사되므로 그림 4(a)의 경우 보다 더 긴 거리를 통과하게 된다. 본 테라헤르츠 시스템의 photoconductive 스위치를 위한 delay line은 transmitter chip에 입사되는 excitation laser beam쪽에 있으므로 이때 반사에 의해 발생된 여분의 거리를 통과하는 시간차만큼 테라헤르츠 펄스는 앞쪽에서 발생된다. 이를 증명하기 위하여 receiver chip 앞의 레이저빔용 광학 렌즈를 chip 방향으로 이동한 후 레이저빔의 초점을 그림 4(b)에 삽입된 그림과 같이 chip의 뒤 부분에서 dipole 안테나에 입사하도록 하였다. 이때 나타난 두 개의 테라헤르츠 펄스가 그림 4(b)에 나타나 있다. 앞에 있는 작은 펄스는 레이저빔이 SOS receiver chip의 뒤 부분에서 반사되어 만든 펄스로 그림 4(a)에 나타나 있는 작은 펄스와 정확히 같은 지점에 펄스가 발생되었음을 알 수 있다. 레이저빔의 초점이 앞에 나타난 테라헤르츠 펄스에 맞추었음

에도 불구하고 주 펄스보다 작은 이유는 chip에 대한 레이저빔의 정렬이 완전하지 않았기 때문이다. 따라서 앞에 나타난 펄스와 뒤에 나타난 주 펄스의 상대적 크기는 레이저빔의 재정렬로 조절할 수 있는데 50:50의 크기로부터 그 각각의 비율을 조절할 수 있었다. 그럼 4(a)와 (b)에 나타난 주 펄스 뒤 12.1 psec의 또 다른 작은 펄스는 레이저빔에 의한 것이기보다는 테라헤르츠 전자기파와 SOS receiver chip에 의한 작용으로 추측되며 여기에 대한 또 다른 연구가 필요할 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. 90 V 이상의 전압을 인가했을 때 두 전송에 대량의 전류가 흘러 전송라인이 파괴되어 더 이상의 전압공급이 불가능하였다. 이와 같은 한계전압은 chip의 종류와 전송라인의 구조에 따라 결정되므로 이를 잘 고려하여 chip을 설계하면 더 높은 전압에 더 큰 진폭을 가진 그리고 고주파영역의 신호 대 잡음비가 향상된 테라헤르츠 전자기파를 발생할 수 있다고 생각된다. 또한 테라헤르츠의 정렬 방법에 의해 스펙트럼을 최대 4 THz까지 확장할 수 있었다.

SOS로 이루어진 receiver chip에 공급되는 레이저빔의 초점 방향에 따라 두 개의 테라헤르츠 전자기 펄스가 검출되었는데, 각각의 펄스크기는 레이저빔의 정렬에 따라 조절 가능함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행되었으며, 본 연구에 조언을 주신 Oklahoma State University의 D. Grischkowsky 교수님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and Ch. Fattiger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 10, pp. 2006-2015, 1990.
- [2] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of conduction in doped silicon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 6, pp. 1106-1109, 1997.
- [3] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Characterization of optically dense, semiconductors by reflection THz time domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 23, pp. 3032-3034, 1998.
- [4] G. Gallot, J. Zhang, R. W. McGowan, T.-I. 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, no. 23, pp. 3450-3452, 1999.
- [5] T.-I. Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and R. Menon, "Electrical characterization of conducting polypyrrrole by THz time-domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 16, pp. 2452-2454, 2000.
- [6] M. Y. Frankel, S. Gupta, J. A. Valdmanis, and G. A. Mourou, "Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 6, pp. 910-915, 1991.
- [7] D. S. Phatak, A. P. Neikirk, and D. P. Kasilingham, *Infrared and Millimeter Waves* (K. J. Button, Ed., Academic, New York, 1983), vol. 10, pp. II.
- [8] A. G. Engel, Jr. and L. P. B. Katehi, "Low-loss monolithic transmission lines for submillimeter and terahertz frequency applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, no. 11, pp. 1847-1854, 1991.
- [9] D. Krokel, D. Grischkowsky, and M. B. Ketchen, "Subpicosecond electrical pulse generation using photoconductive switches with long carrier lifetimes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, no. 11, pp. 1046-1047, 1989.
- [10] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, 1991), Chapter 3.

#### The characteristics of terahertz electromagnetic pulses by electrical and optical parameters.

Tae-In Jeon

Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, KOREA  
E-mail: jeon@hanara.kmaritime.ac.kr

(Received May 2, 2001 ; revised manuscript received November 14, 2001)

When DC voltages from 5 V up to 90 V are applied to a transmitter chip excited by an ultrafast laser beam, the terahertz electromagnetic pulses and their spectra are changed. The spectrum shifts to the high frequency range when the high DC voltage is applied to the chip. At that time, the signal-to-noise ratio is increased from 250:1 to 10,000:1. The spectrum can expand up to 4 THz by optimal realignment of the THz system. Also, two terahertz electromagnetic pulses are generated from a receiver chip when the laser detection beam is reflected to the back side of the chip.

*Classification codes :* OC.010, SM.030.