

좁은 간격의 테라헤르츠 다이폴 안테나를 이용한 이진신호의 발생과 검출

전태인[†] · 김근주

한국해양대학교 전기전자공학부

Ⓣ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

(2002년 7월 22일 받음, 2002년 9월 19일 수정본 받음)

12.5 μm 길이, 5 μm gap의 dipole 안테나에 입사되는 펄스 레이저의 위치에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기를 관찰하였다. 비록 11 volt의 작은 전압을 인가 시켰음에도 불구하고 테라헤르츠 전자기 펄스가 최대 4.7 nA의 전류로 발생되었는데 이는 dipole 안테나 구조가 아닌 두 전송라인(transmission line)의 간격이 300 μm 떨어진 구조의 송신기(transmitter chip)에 비해 6배 작은 전압을 인가하여 3.4배 더 큰 전류가 발생됨을 알 수 있었다. 또한 펄스 레이저로 여기 되는 dipole 안테나 구조의 송신기에 구형 교류전압을 최소 0.11 volt 에서 최대 10 volt 까지 변화시켜 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값 크기에 따른 이진신호를 발생시켰다.

주제어 : terahertz, dipole antenna, binary signal.

I. 서 론

Photoconductive 방법에 의한 테라헤르츠 전자기 펄스의 발생과 검출이 개발된^[1] 이래 테라파의 크기와 스펙트럼의 확장은 많은 과학자들의 관심의 대상이었다. 최근 테라헤르츠 전자기 펄스를 이용하여 기존의 GHz나 IR 영역에서 분석이 불가능한 carbon nanotube,^[2,3] 전도성 폴리머,^[4,5] 그리고 반도체^[6,7] 등에 대한 물질의 특성 분석에 활용되어 왔으며, 국내에서도 최근 테라헤르츠에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^[8,9] 하지만 테라헤르츠라는 높은 주파수 영역의 전자기파임에도 불구하고 전송라인을 따라 전파하는 테라헤르츠 전자기 펄스에 대한 연구는 이루어졌으나^[10,11] 공기 중을 직접 전파하는 무선 통신의 영역에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 두 개의 전송라인(transmission line)에 공급되는 직류전압을 변화시켜 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기를 변화시키는 연구는 수행되었지만,^[12] dipole 안테나 구조의 송신기에 공급되는 전압을 교류전압으로 사용하여 테라헤르츠 전자기 펄스의 진폭변조에 해당하는 연구는 아직 시도된 적이 없다. 본 연구에서는 테라파를 이용하여 공기 중을 전파하는 정보전달의 한 방법으로 dipole 안테나 구조의 송신기(transmitter chip)와 수신기(receiver chip)를 사용하여 교류입력 전압에 대한 테라파의 진폭변조에 해당하는 기초 연구를 수행하였다. Dipole 안테나 구조의 송신기는 큰 전압이 요구되는 전송라인 구조의 송신기 보다 아주 작은 직류전압에 민감하게 테라파의 크기가 결정되므로 기존의 통신 시스템에 사용되는 신호원을 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다. Dipole 안테나 구조의 송신기에 공급되는 구형과 교류 최대 전압을 10볼트에서 0.11볼트로 약 100배 줄였음에도 불구하고 테라헤르츠 전자기 펄스의 신호 대 잡음

비가 각각 10,000:1에서 300:1로 줄어들어 여전히 높은 신호 대 잡음비를 가지고 있음을 알 수 있었고, 진폭변조에 아주 이상적임을 관찰 할 수 있었다. 또한 dipole 안테나에 입사되는 펄스 레이저의 위치에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대진폭 값을 확인하기 위해 dipole을 따라 레이저빔을 이동시켜 각 테라헤르츠 전자기 펄스를 3차원 적으로 표시하였으며 dipole 안테나의 gap 부분에서 최대의 테라헤르츠 전자기 펄스가 존재함을 관찰하였다.

II. 실험장치

본 연구에서 사용된 테라헤르츠 시스템은 그림 1(a)에 나타나 있다. 약 90 fs, 820 nm의 파장, 86 MHz의 반복률(repetition rate)을 가진 Ti:sapphire 펄스 레이저를 이용하여 송신기와 수신기에 각각 7 mW, 11 mW의 레이저 power를 공급하여 THz 전자기 펄스를 발생 및 검출하였다. GaAs의 기판 위에 dipole 안테나 구조로 이루어진 송신기는 그림 1(b)와 같이 30 μm 의 간격과, 10 μm 의 폭을 가진 두 개의 금속성 전송라인에 각 길이 12.5 μm 폭 20 μm 의 dipole에 5 μm 의 안테나 gap으로 구성되어 있으며 전송라인의 끝 부분은 교류(혹은 직류) 전압과 연결되어 있다. GaAs 송신기는 금속과 반도체의 ohmic 접촉을 향상시키기 위해 200°C에서 2분, 420°C에서 30초 동안 담금질(anneal) 시켰다. 그리고 수신기는 silicon on sapphire (SOS) 위에 그림 1(c)와 같이 송신기와 같은 구조로 이루어졌으며 전송라인의 끝 부분은 전류계와 연결되어 있다. 송신기에서 발생된 테라파는 6.46 mm의 높이와 5 mm의 반경을 가진 high-resistivity 단결정 실리콘으로 만든 렌즈를 통하여 지름이 2"인 paraboloidal 거울로 입사된다. Paraboloidal 거울에 반사된 테라파는 송신부와 같은 형태의 paraboloidal 거울과 실리콘 렌즈를 통하여 수신기에 입사되며 두 paraboloidal

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

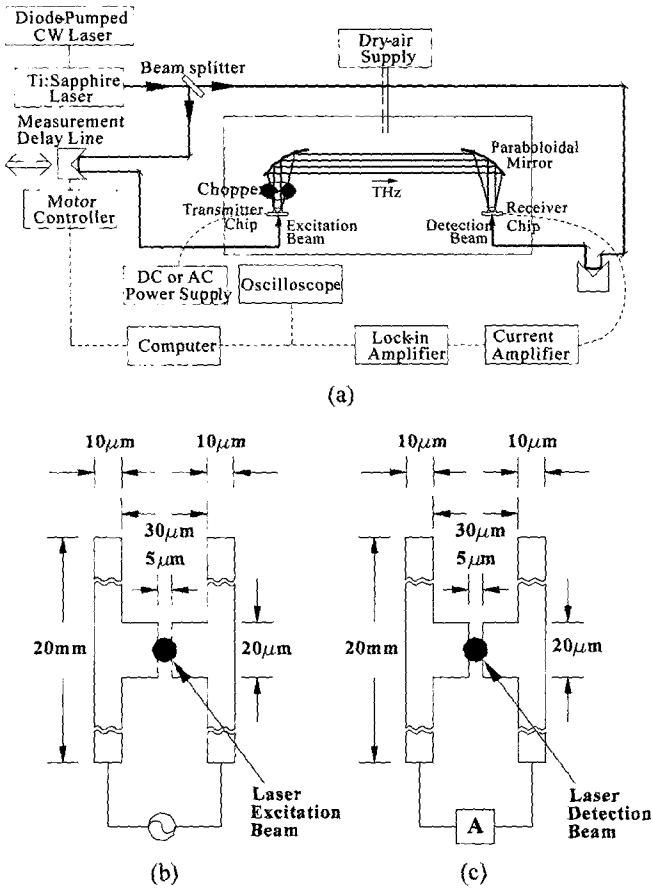


그림 1. (a) 테라헤르츠 실험장치 구성도. (b) 송신기 dipole 안테나. (c) 수신기 dipole 안테나.

사이의 거리는 각 초점거리의 두 배인 23.8 cm를 유지시켰다. 실리콘 렌즈와 chip 사이에서의 반사 손실을 줄이기 위해 실리콘 렌즈의 윗 부분에 고무 링을 두고 약한 압력을 가하여 렌즈와 chip을 접촉시켰다.^[12] Detection 레이저빔을 SOS dipole 안테나의 gap에 입사시켜 photoconductive switch 방법에 의해 테라헤르츠 전자기 펄스에 해당하는 전류를 검출하였다.^[11] 수신된 테라헤르츠 전자기파는 전류증폭기를 통하여 증폭된 후 lock-in 증폭기에서 신호만 찾아 전압신호원으로 출력된 후 pc 또는 오실로스코프를 통하여 그 값을 읽어드렸다.

본 실험에서 사용된 수신기는 레이저의 반복률에 해당하는 86 MHz의 수신 능력을 가지고 있지만 신호원을 찾기 위해 사용된 lock-in 증폭기의 time constant를 10 msec, 24 dB/oct에 두고 테라헤르츠 이진신호를 관찰하였다. 하지만 테라헤르츠 전자기 펄스를 측정하기 위해 time constant는 100 msec 24 dB/oct로 충분한 시간을 두어 테라헤르츠 전자기 펄스의 왜곡을 최대한 방지하며 측정하였다.

III. 실험결과

3.1. 레이저빔의 위치에 따른 테라헤르츠 진폭크기

5 µm gap의 송신 dipole 안테나 구조는 수십 혹은 수백 µm 떨어진 전송라인 구조의 송신기 보다 전기장이 dipole 안

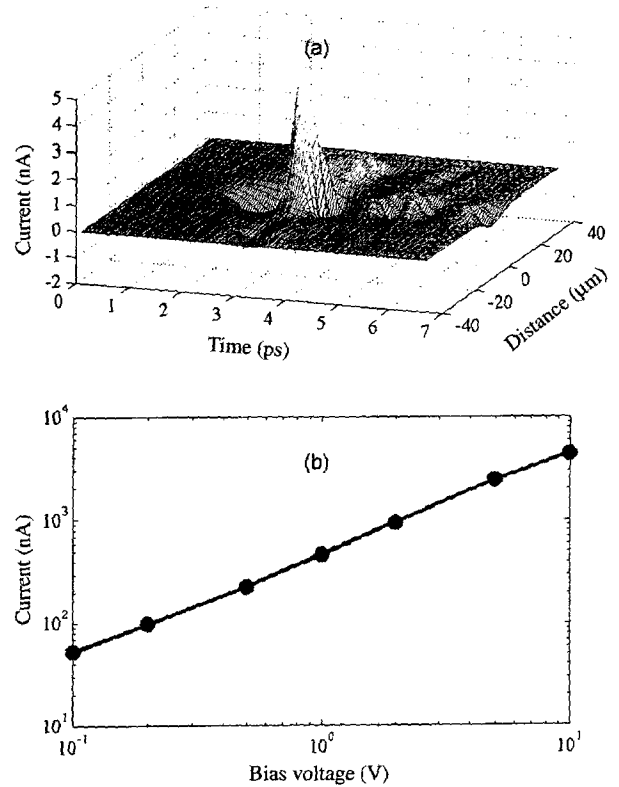


그림 2. (a) Dipole 안테나 각 지점에서의 테라헤르츠 전자기 펄스. (b) 입력전압에 대한 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값.

테나 gap 부분에 집중되어있다. 그림 2(a)는 본 실험에서 사용된 GaAs dipole 안테나에 11볼트의 직류전압을 인가한 후 dipole 안테나를 따라 레이저빔을 이동시켰을 때 발생한 테라헤르츠 전자기 펄스를 3차원적으로 보여주고 있다. 0 µm 지점이 dipole 안테나의 gap 중앙부분으로 이곳에서 가장 큰 테라헤르츠 전자기 펄스인 4.7nA의 전류가 발생되었으며, dipole 안테나 방향으로 레이저빔이 이동될수록 급속히 테라헤르츠 전자기 펄스가 감소됨을 알 수 있다. Dipole 안테나 gap의 중앙지점에서 안테나 방향으로 ±10 µm 떨어진 지점이 gap의 중심지점보다 약 15%의 작은 크기로 테라헤르츠 전자기 펄스가 감소되었는데 이는 gap 부분에서 전기장의 밀도가 가장 높으며 GaAs에서 발생된 광 운반자(photo carrier)가 금속의 dipole 안테나 방향으로 순간 가속을 하기 때문이다. 0 µm 부근의 테라헤르츠 전자기 펄스 뒤에 발생된 파동성분은 공기중의 수분에 의한 영향으로 수분이 제거된 건조한 공기를 넣으면 제거 될 수 있다.^[11-7,12]

그림 2(b)는 레이저빔을 GaAs 송신 dipole 안테나의 gap 부분에 입사한 후 dipole 안테나에 인가된 전압에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값을 표시한 그래프로 0.11볼트의 아주 작은 직류전압을 인가하여도 50 pA의 전류와 300:1의 신호 대 잡음비를 얻을 수 있어 테라헤르츠 진폭변조에 적합한 구조임을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 송신기의 GaAs dipole 안테나와 동일한 chip에 두 전송라인 사이의 간격을 300 µm로 하고 70볼트의 직류전압을 인가했을 때 테

라헤르츠 전자기 펄스의 최대값이 1.4 nA로 나타났다. 하지만 그림 2(b)에서 보느냐와 같이 dipole 안테나에 10볼트의 직류 전압을 인가하여 최대 4.3 nA의 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값을 얻을 수 있어 dipole 안테나 구조가 더 효율적임을 알 수 있다. 하지만 5 μm의 gap 구조로 인해 수mA의 전류가 흐르면 단락 될 위험이 있어 실험시 각별한 주의가 요망된다.

3.2. 테라헤르츠 전자기 펄스에 의한 이진신호의 발생과 검출

테라헤르츠 전자기 펄스에 의한 이진신호를 발생하기 위해 레이저빔을 GaAs 송신기의 dipole 안테나 gap에 입사시킨 후, 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값 부분에 그림 1(a)에서의 delay line을 고정하고 구형파 교류전압을 송신기에 인가했다. Delay line이 고정되어 있으므로 송신기에 부여되는 교류전압의 크기에 따라 테라헤르츠 전자기 펄스의 최대값 크기가 그림 2(b)와 같이 결정되고 입력되는 교류전압과 동일한 형태의 파형을 얻을 수 있다. 그림 3(a)는 dipole 안테나에 입력된 최대전압이 0.11볼트, 주파수가 1 Hz인 구형파 교류전압 그래프이고 그림 3(b)는 그림 3(a)의 입력 교류전압에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 이진신호이다. 테라파 이진신호에서 나타나는 ripple 성분은 lock-in 증폭기의 time constant를 작게 해

서 생겨나는 현상으로 이를 제거하기 위해 time constant를 증가시키면 시간지연이 발생하여 진폭변조에 부적합하다. 하지만 이러한 ripple의 크기는 time constant와 함께 항상 그 크기가 고정되어 있어 높은 교류전압을 인가했을 때 거의 무시할 수 있다. 이와 같은 현상은 lock-in 증폭기에 의해서 일어나지만 이온이 주입된 SOS 수신기에서는 detection 레이저 빔에 의해 형성된 광 운반자가 송신기의 dipole 안테나를 연결하여 ON 상태를 유지한 후 약 600 fs 후에 소멸되어^[13] dipole switch가 OFF 상태로 되므로 86 MHz의 레이저 반복률에 충분히 반응할 수 있다.

그림 3(c)는 peak-to-peak 교류전압을 ±5볼트 그리고 주파수가 1 Hz일 때 측정된 테라헤르츠 전자기 펄스의 이진신호이고, 그림 3(d)는 peak-to-peak 교류전압을 ±5볼트 그리고 주파수가 5 Hz일 때 time constant를 3 msec로 두어 측정된 테라헤르츠 전자기 펄스의 이진신호이다. 테라헤르츠 전자기 펄스의 이진신호가 “-” 값을 가지는 것은 dipole 안테나의 극성이 바뀌어서 위상이 π rad 만큼 변화되어 테라파의 최대값이 최소값으로 바뀌었기 때문이다. 5 Hz의 이진신호는 1 Hz의 이진신호보다 ripple의 크기는 증가하였지만 상승시간 및 하강시간은 48 msec에서 4.7 msec로 약 10배 감소되어 이진신호의 해상도(resolution)가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

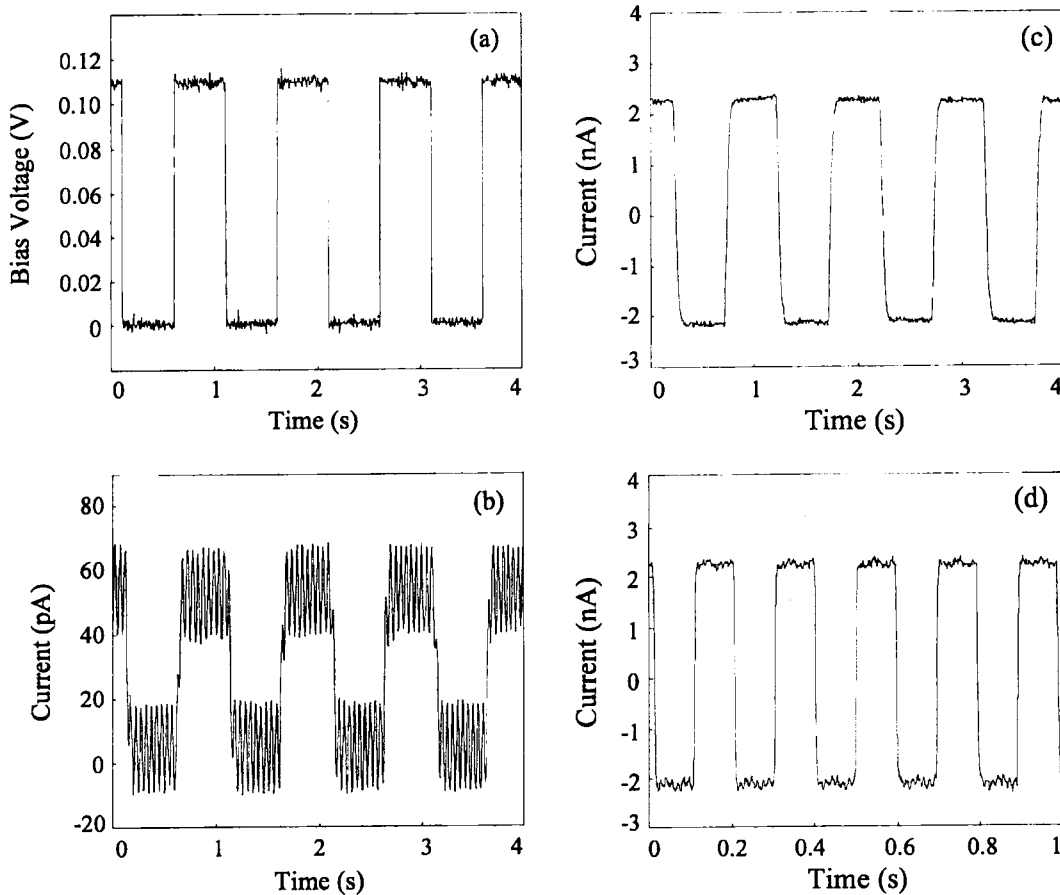


그림 3. 측정된 이진신호. (a) Dipole 안테나 송신기에 입력된 구형파 교류전압. (b) (a)의 입력 교류전압에 대한 이진신호. (c) ±5볼트, 1 Hz의 입력 교류전압에 대한 이진신호. (d) ±5볼트, 5 Hz의 입력 교류전압에 대한 이진신호.

IV. 결 론

본 연구에서는 dipole 안테나 구조의 송신기에 입사되는 레이저 excitation beam의 위치에 따른 테라헤르츠 전자기 펄스의 크기를 관찰하였으며, 테라헤르츠 발생용 dipole 송신기에 구형파의 교류전압을 인가함으로써 테라헤르츠 전자기 펄스를 이용하여 이진신호로 만들었다. 또한 교류전압의 크기를 조절함으로써 테라헤르츠 전자기 펄스의 진폭변조가 가능한 이진신호임을 알았다. Dipole 안테나 구조의 송신기는 전송라인 구조의 송신기에 비해 전압에 민감하게 응답하며 본 연구에서는 입력전압은 최소 6배 작고 테라헤르츠 신호는 최대 3.4배 증가되어 테라헤르츠 전자기 펄스의 진폭변조에 효율적이고 이상적인 구조임을 확인하였다. 입력교류전압을 0.11볼트에서 10볼트까지 변화시켜 테라헤르츠 전자기 펄스의 이진신호를 발생했으며, 입력 교류신호의 모양과 크기에 비례함을 알 수 있었다. 이러한 송신기와 수신기를 사용하면 기존의 통신 시스템에서 사용되는 장비를 직접 사용하여 테라헤르츠 전자기 펄스의 진폭변조를 할 수 있다는 장점이 있다. 이를 위해 수신기에서 직접 전류를 측정하거나 lock-in 증폭기의 time constant를 개선 할 수 있는 연구가 앞으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Ch. Fattinger and D. Grischkowsky, "Terahertz beams," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, pp. 490-492, 1988.
- [2] T.-I. Jeon, K. J. Kim, C. Kang, S. J. Oh, J. H. Son, K.H. An, D. J. Bae, and Y. H. Lee, "Terahertz conductivity of anisotropic single walled carbon nanotube films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 3403-3405, 2002.
- [3] T.-I. Jeon, J. H. Son, G. H. An, and Y. H. Lee, "Characterization of carbon nanotubes by THz time-domain spectroscopy," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 39, pp. s185-s188, 2001.
- [4] T.-I. Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and Reghu Menon, "Electrical and optical characterization of conducting poly-3-methylthiophene film by THz time-domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 4142-4144, 2001.
- [5] T.-I. Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and Reghu Menon, "Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, pp. 2452-2454, 2000.
- [6] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of conduction in doped silicon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, pp. 1106-1109, 1997.
- [7] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Characterization of optically dense, semiconductors by reflection THz time domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, pp. 3032-3034, 1998.
- [8] J. Y. Sohn, Y. H. Ahn, D. J. Park, E. Oh, and D. S. Kim, "Tunable terahertz generation using femtosecond pulse shaping," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 13-15, 2002.
- [9] 백승용, 김정호, "테라헤르츠 전자파 측정 및 응용기술," 한국전자파 학회지, 제11권, pp. 35-51, 2000.
- [10] 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, pp. 910-915, 1991.
- [11] 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, pp. 1847-1854, 1991.
- [12] 전태인, "전기적 광학적 변화가 테라헤르츠 전자기 펄스의 모양에 미치는 영향," 한국광학회지, 제12권 6호 pp. 503-506. 2001.
- [13] N. Katzenellenbogen and D. Grischkowsky, "Efficient generation of 380 fs pulses of THz radiation by ultrafast laser pulse excitation of a biased metal-semiconductor interface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 222-224, 1991.

The generation and detection of binary signals by narrow terahertz dipole antenna

Tae-In Jeon[†] and Keun-Ju Kim

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

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

(Received July 22, 2002 ; Revised manuscript received September 19, 2002)

We present the magnitude of terahertz electromagnetic pulses when femtosecond laser pulses are moving along to a dipole antenna. The dipole antenna chip has maximum 4.7 nA THz current, generated at 11 DC volt. This current is 3.4 times bigger than the current of a 300 μm separated transmission line structure chip that has 70 DC volt. We also apply an AC square wave voltage to the dipole antenna from 0.1 volt to 10 volt for binary signals using the terahertz electromagnetic pulses.

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