

테라헤르츠 전자기파 펄스의 변조를 이용한 이미징의 해상도 연구

오승재 · 강 철 · 손주혁[†]

서울시립대학교 물리학과

Ⓣ 130-743 서울특별시 동대문구 시립대길 13 (전농동 90번지)

(2003년 7월 22일 받음, 2004년 1월 2일 수정본 받음)

테라헤르츠 전자기파 펄스(테라파)의 변조를 통하여 주파수별 영상을 얻었다. 갈바노미터를 이용한 고속홀기방법으로 시간 축 신호를 실시간으로 획득하였고, 이를 fast Fourier transformation을 통하여 주파수별 신호로 변환하였다. 테라파 집속지점에서 파의 공간 분포를 주파수별로 얻었으며 주파수가 증가 할수록 집속직경이 축소됨을 확인하였다. 이 집속지점에서 1차원과 2차원 시료를 이동시킴으로써 각각의 주파수별 영상을 얻었고 주파수가 증가할수록 영상의 해상도가 증가함을 확인하였다. 또한 가려진 시료에 테라파를 투과시킴으로써 비파괴영상을 얻었다.

주제어 : THz electromagnetic pulses, imaging, modulation.

I. 서 론

테라헤르츠(terahertz, THz) 주파수 대역의 전자기파는 최근 까지 효과적인 발생 및 검출 방법의 부재로 인하여 그 사용에 많은 제약이 있었다. 하지만 극초단파 펄스 레이저의 발전과 광전도 매질이나 헤르쯔 다이폴을 이용한 이 영역대의 전자기 파를 발생시키는 결맞은소스의 개발은 이 영역 안에서의 연구를 가능하게 하였다.^[1,2] 또한 최근에는 quantum-cascade laser를 이용하여 이 영역의 신호를 발생시키기도 했다.^[3] 테라헤르츠 전자기파의 투과 및 반사 실험에서 얻어지는 신호를 통해 물질의 유전상수나 전도도를 알 수 있다.^[4,5] 그리고 분자의 회전 및 진동에너지가 이 영역 안에 위치하므로 액체나 가스등의 분광분석에 많이 이용되고 있다.^[6] 또한 이 대역은 라디오 주파수와 마이크로파 같은 낮은 주파수 영역대나 가시광선이나 X선과 같은 높은 주파수 영역대의 중간에 위치하고 있다. 그러므로 낮은 주파수 영역대의 특성인 투과성과 높은 주파수 영역대의 특성인 직진성을 동시에 가지고 있다. 따라서 이 대역에서 물질의 고유한 반응성과 투과 및 직진성은 알지 못하는 물체의 공간상 물질 분포 및 형태 등을 영상화 할 수 있게 한다.^[7,8] 특히 광전도 안테나나 광정류 방법에 의해 발생된 테라헤르츠 펄스는 미지의 물체에 대한 펄스의 투과 및 산란 신호의 분석을 통해 3차원 영상화 또는 단층촬영 등의 비파괴 영상화에 이용 될 수 있다.^[9-11]

영상화의 실질적 응용을 위해서는 그 영상을 얻는 속도와 해상도가 중요하다. 영상의 획득 속도는 갈바노미터를 이용한 고속 홀기(fast-scanning) 방식을 이용해서 실시간으로 결정되며, 해상도는 영상을 이루는 각 위치에서의 전자기파의 집속 직경에 의해 결정되므로 각 지점에서의 집속직경이 해상도에 중요한 영향을 미치게 된다. 이러한 전자기파의 집속직경은 각

주파수별 회절한계에 영향을 받는다.^[12] 그러므로 주파수는 테라헤르츠 영상 시스템의 해상도를 결정하는 직접적인 요인이 된다. 본 연구에서는 실시간으로 얻은 시간축상의 테라헤르츠 전자기 펄스신호에서 fast Fourier transform을 이용하여 주파수별 신호를 추출하였고 이를 통하여 각 주파수에 따른 영상을 얻고 그 해상도의 비교연구를 수행하였다. 본 실험 결과는 테라헤르츠 통신 및 영상장치의 개발을 위한 귀중한 기초 자료가 될 것으로 생각된다.

II. 실험장치구성

테라헤르츠 전자기파의 발생과 검출을 위한 소스로는 Spectra-Physics 사의 고체레이저 Millenia V를 이용하여 5 W로 pumping된 Ti:sapphire 레이저인 Tsunami를 사용하였다. 이때 레이저의 반복률은 82 MHz이고 중심파장은 790 nm이며 띠너비는 14 nm이고 펄스너비는 82 fs이다. 이 레이저는 그림 1과 같이 beamsplitter를 통해 두 개의 경로로 나누어지고 각각 8 mm 초점 길이에 20배의 확대 폭을 가진 집속 렌즈를 사용하여 10 V의 전압을 인가한 transmitter chip과 current pre-amplifier에 연결 되어있는 receiver chip에 집속 되었다. 그림 2(a)와 같이 transmitter chip은 GaAs 웨이퍼위에 다이폴 형태의 헤르쯔안 안테나를 Ti/Au로 증착하여 제작하였다. 이 다이폴 갭 사이의 간격과 다이폴의 폭은 각각 5 μ m와 20 μ m이고 각 라인의 너비는 5 μ m이었으며 두 라인 사이의 간격은 80 μ m으로 하였다. Receiver chip은 carrier의 수명이 약 250 fs로 아주 짧은 LT-GaAs 웨이퍼 위에 그림 2(b)와 같은 다이폴 안테나를 Ti/Au 라인을 이용하여 증착시켰다. 이때 다이폴 갭 사이의 간격, 폭, 그리고 라인의 너비는 모두 동일하게 5 μ m이며 두 라인 사이의 간격은 20 μ m이다. 자유공간과 웨이퍼의 굴절률 차에 의해 발생하는 전반사 현상 방지와 집속된 레이저에 의해서 발생하는 테라헤르츠 전자기파의 공간상의 퍼짐

[†]E-mail: joohiuk@uos.ac.kr

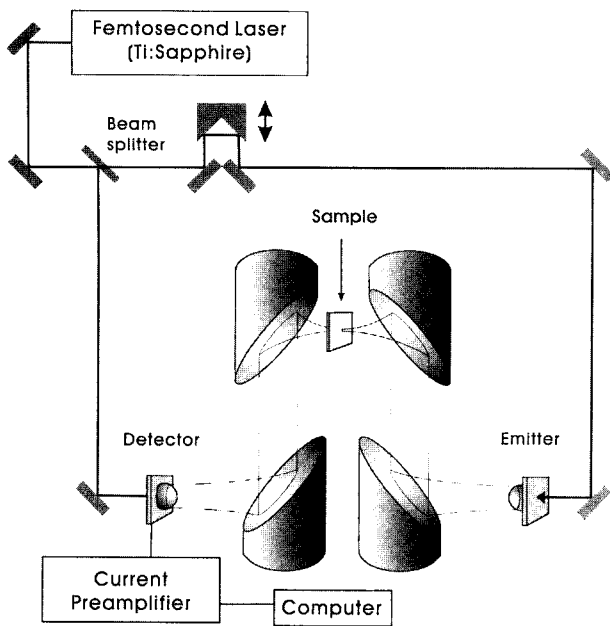


그림 1. 테라헤르츠 영상화 실험장치의 개략도.

을 줄이기 위해 이 주파수 대역에서 매우 좋은 투과성을 가지며 GaAs 표면과 비슷한 굴절률을 가지고 있는 실리콘 렌즈를 제작하여 chip 뒤에 부착시켰다. 이 실리콘 렌즈는 지름이 8.9 mm이고, 높이가 6.1 mm인 hyper-hemispherical 형태로 제작하였으며 약 $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 의 저항값을 가지고 있다. 이렇게 발생된 테라헤르츠 전자기파를 샘플과 receiver로 집속하기 위해 그림 1과 같이 각각 초점길이가 4인치, 2인치인 off-axis 파라볼릭 미러를 한 쌍씩 사용하였다.

Fast-scanning 방법을 위해 retro-reflector를 부착시킨 galvanometer로는 Clark-MRx 사에서 제작한 optical delay line (ODL-150)을 사용하였으며, 이 때 훑기 반복률은 함수발생기를 사용하여 20 Hz로 유지하였다.

주파수 변화에 따른 해상도 향상을 확인하기 위해 사용된 샘플은 그림 3과 같이 1차원 데이터를 얻기 위해서 3-2-1-0.5 mm의 폭과 10 mm의 길이를 가진 은실선을 종이 표면

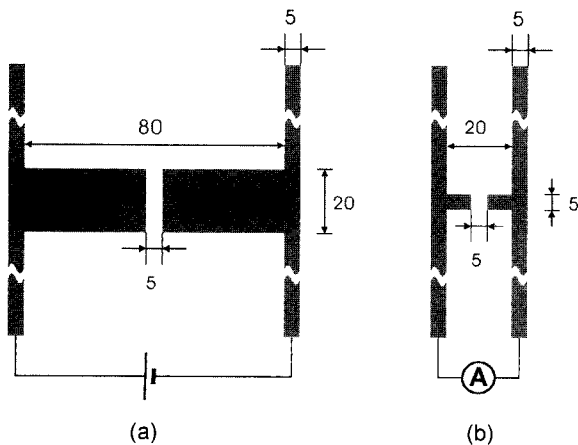


그림 2. transmitter chip 및 receiver chip.

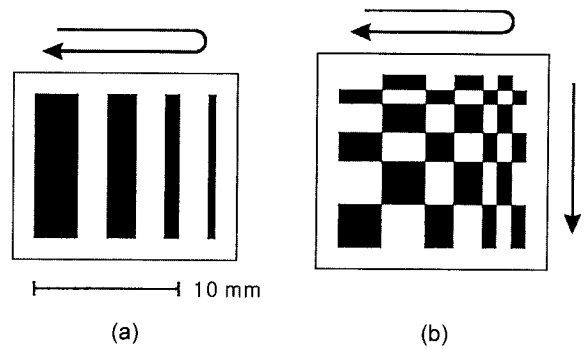


그림 3. (a) 1차원 시료 (b) 2차원 시료(화살표는 시료의 이동 방향).

에 2 mm 간격으로 배열하였으며, 영상 획득의 기초자원이 되는 2차원 데이터를 위해서는 샘플의 폭이 3-2-1 mm인 직사각형을 서로 엇갈리게 배열하였고 이를 테라파가 집속된 곳에서 x-y축으로 이동하면서 신호를 얻었다. Receiver chip으로 받아들인 신호는 current preamplifier를 통해서 증폭되었고 이를 오실로스코프를 통해 실시간으로 획득하였으며, 디지털 신호로 변환한 후 PC에서 조합 및 처리되어 영상을 얻었다.

III. 실험 결과

3.1. 테라파

Transmitter chip쪽으로 집속되는 레이저를 20 Hz 주기와 약 20 ps 진폭으로 빨리 왕복시키는 optical delay line(ODL)을 지나게 하여 receiver chip 쪽의 레이저 펄스와 경로차이를 주었다. 이 때의 경로 차이에 의해 얻어진 상관신호를 current preamplifier로 증폭시킨 후 오실로스코프를 통해 획득하였다. 이 때 current preamplifier는 1 kHz, 6 dB bandpass filter를 사용하였으며 증폭률은 2 nA/V로 고정하였고 이 때 얻어진 시간축에 의한 신호는 그림 4(a)와 같고 신호대 잡음비는 140:1이다. 그림 4(b)는 오실로스코프에 의한 실시간 fast Fourier transformation (FFT)를 이용하여 주파수별 신호 파형으로 대략 2.5 THz까지의 선폭과 50 GHz의 주파수분해능을 보여준다. 시간축 신호의 뒷부분에서 나타나는 찌그러진 파형들과 주파수 축의 0.6, 1.3, 1.8, 2.4 THz 부근에서의 골들은 대기 중의 수분에 의한 흡수를 나타낸다.

3.2. 집속 후의 테라파의 knife edge 결과

주파수의 증가에 따른 집속 지름의 변화를 측정하기 위해서 스테퍼 (stepper)를 사용하여 집속 부위에서 칼날을 1차원으로 50 μm 씩 이동시키면서 각각 0.4, 0.8, 1.2 THz에서의 신호와 적분 된 신호를 얻었다. 그림 5에서와 같이 주파수가 증가함에 따라 신호의 감소 기울기가 증가하였고 신호크기의 40%의 지점에서 2.02, 1.64, 1.56 mm로 빔의 집속직경은 감소하였다. 그리고 적분된 값은 1.76 mm로 이것은 0.4 THz와 0.8 THz의 중간 값에 해당한다. 이것은 이 실험에서 얻어진 주파수별 신호가 대략 1 THz 아래 분포하기 때문에 비교적 낮은 주파수 영역대의 영향을 많이 받은 것이다.

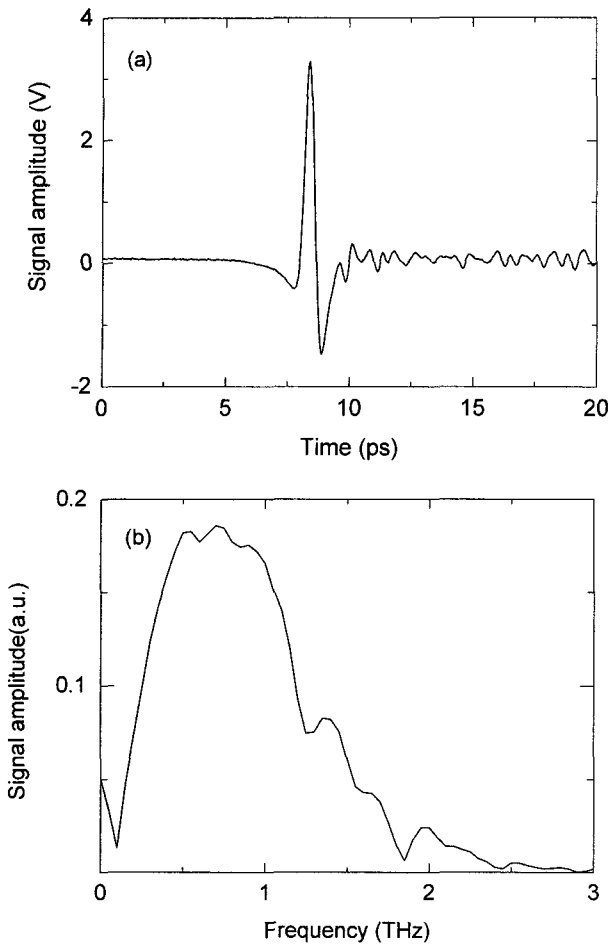


그림 4. (a) 시간축 상에서의 테라헤르츠 신호 (b) 주파수축 상에서의 테라헤르츠 신호.

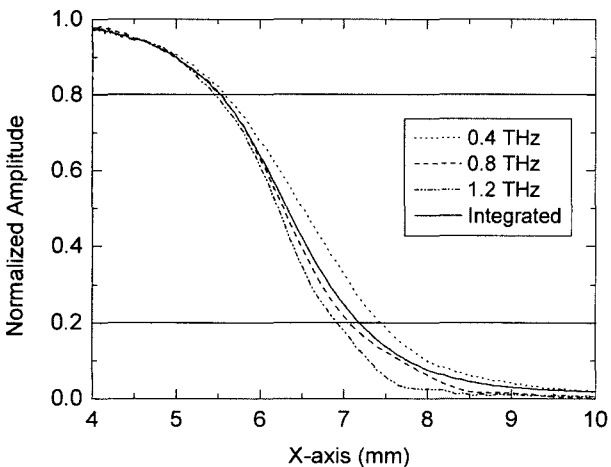


그림 5. 주파수에 따른 집속된 빔의 분포.

3.3. 1차원 주파수별 해상도

스테퍼를 이용한 delay rail를 사용하여 그림 3(a)과 같은 시료를 가로방향으로 50 μm씩 이동시키면서 0.4, 0.8, 1.2 THz의 주파수별 신호와 적분된 신호를 얻었고 이를 통해 1차원상의 주파수별 해상도의 변화를 보였다. 그림 6에서와 같이 주파수의 증가에 따라 시료의 형태 따른 변화폭과 은실선의 경

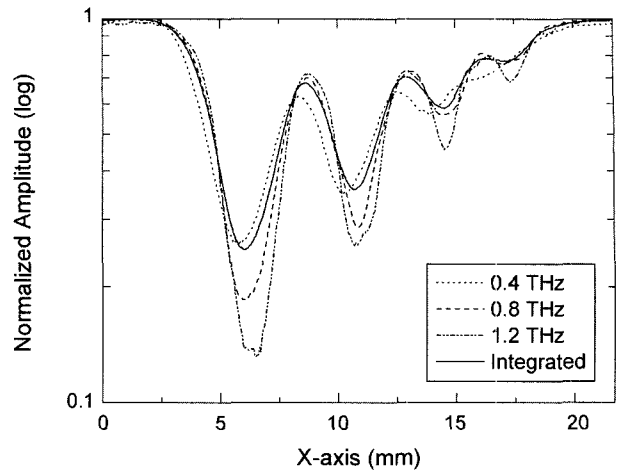


그림 6. 1차원에서의 주파수별 영상.

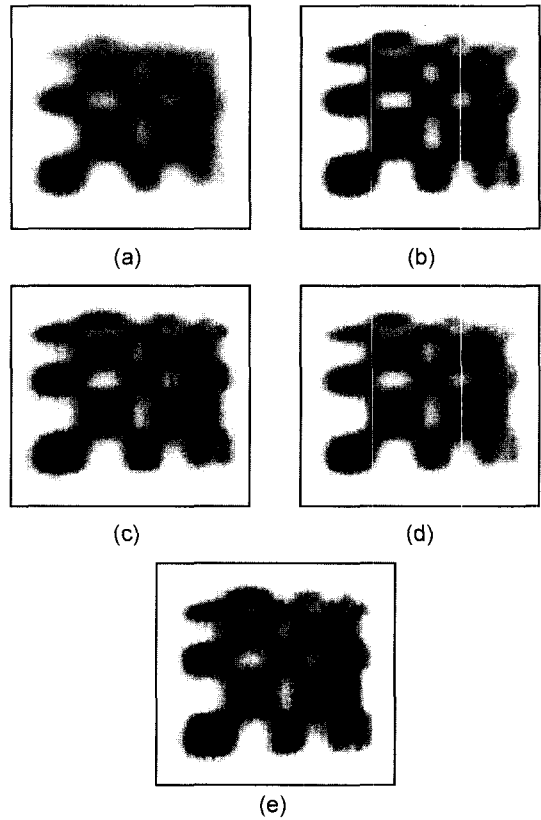


그림 7. 2차원에서의 주파수별 영상 (a) 0.4 THz (b) 0.8 THz (c) 1.2 THz (d) 적분된 신호 (e) 종이로 가린 1.2 THz에서의 2차원 영상.

계에서의 기울기가 증가하고 1.0, 0.5 mm의 은실선의 정보가 관찰되며 특히 0.5 mm의 경우에는 0.4 THz에서는 관찰되지 않으나 0.8 THz와 적분된 신호에서 점차로 그 형태가 나타나고 1.2 THz에서는 분명하게 관찰되었다. 이를 통해 주파수의 증가에 따른 해상도의 증가를 확인 할 수 있다.

3.4. 2차원 주파수별 해상도

시료 3(b)를 가로 세로 방향으로 100 μm씩 이동시키면서 2

차원의 영상을 얻었다. 그림 7(a)와 같이 0.4 THz에서는 식별 되지 않던 좁은 폭을 가진 시편들을 그림 7(b),(c)와 같이 주파수가 증가할수록 분명하게 식별 할 수 있었다. 또한 그림 7(b)와 같이 0.8 THz에서 희미하게 보이는 2 mm 시편의 경계가 그림 7(c)과 같이 1.2 THz에서는 선명하게 되는 것을 볼 수 있다. 특히 1.2 THz 주파수의 경우에는 수밀리미터의 시편 까지도 식별 할 수 있다. 적분된 신호는 0.2 THz에서부터 2 THz까지의 신호를 적분한 것이며 그 해상도는 그림 7(d)에서와 같이 0.4 THz와 0.8 THz의 중간에 위치함을 확인 할 수 있다. 이것도 역시 주파수의 신호가 대략 0.6 THz를 중심으로 하여 분포하고 있기 때문에 이 대역의 주파수의 영향을 크게 받은 것이다. 또한 이 시료를 종이로 가린 후 1.2 THz에서 그림 7(e)와 같은 영상을 얻었으며 이로 인해 테라헤르츠 전자기파를 이용한 비파괴영상화의 가능성을 확인하였다.

IV. 결 론

가시광선에 비해 물질에 대한 투과성이 우수한 테라헤르츠 전자기파를 이용하여 주파수 대역별 해상도를 비교하였고 비파괴 검사의 가능성을 확인하였다.

광전도 방법을 사용하여 테라헤르츠 전자기파를 발생시켰고 발생된 파는 포물면 거울을 사용하여 집속 하였고 집속 초점 위에서 시료를 이동시킴으로써 서로 다른 두 가지 시료의 모양으로 영상화 실험을 하였다. 고속훈기 방법을 사용하여 실시간으로 테라헤르츠 전자기파의 파형을 얻었고 동시에 FFT를 하여 주파수 대역별 신호를 추출하였다. 영상화 신호를 주파수 대역별로 나누었고 영상의 해상도가 주파수에 따라서 개선됨을 확인하였다. 또한 눈으로 볼 수 없는 정보를 가시화 하였으며 이를 통하여 테라헤르츠 전자기파를 이용한 비파괴 검사의 가능성을 확인하였다.

위의 결과를 통하여 더 나은 영상화 장치의 개발을 위해서는 좀더 높은 주파수 대역을 얻을 수 있는 소스의 개발과 검출방법에 대한 연구가 필요하며 이와 동시에 여러 물질에 대한 주파수별 정보의 library화가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-99-041-E00220)과 2002년도 서울시립대학교 교내연구비 지원으로 연구 되었습니다.

참고문헌

- [1] J. -H. Son, W. Sha, J. Kim, T. B. Norris, J. F. Whitaker, and G. A. Mourou, "Transient velocity overshoot dynamics in GaAs for electric fields < 200 kV/cm," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 7, pp. 923-925, Aug. 1993.
- [2] J. -H. Son, T. B. Norris, and J. F. Whitaker, "Terahertz electromagnetic pulses as probes for transient velocity overshoot in GaAs and Si," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, pp. 2519-2527, Dec. 1994.
- [3] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," *Nature (London)*, vol. 417, pp. 156-159, May. 2002.
- [4] M. van. Exter, and D. Grischkowsky, "Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2 THz," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 17, pp. 1694-1696, April. 1990.
- [5] T. -I. Jeon, and D. Grischkowsky, "Nature of conduction in doped silicon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, pp. 1106-1108, Feb. 1997.
- [6] H. Harde, N. Katzenellenbogen, and D. Grischkowsky, "Terahertz coherent transients from methyl chloride vapor," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, no. 6, pp. 1018-1030, Jun. 1994.
- [7] B. B. Hu, and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1716-1719, Aug. 1995.
- [8] D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray imaging," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron*, vol. 2, pp. 679-692, Sep. 1996.
- [9] D. M. Mittleman, Stefan. Hunsche, Luc. Boivin, and Martin. C. Nuss, "T-ray tomography," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 904-906, June. 1997.
- [10] J. L. Johnson, T. D. Dorney, and D. M. Mittleman, "Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 6, pp. 835-837, Feb. 2001.
- [11] R. A. Cheville, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky, "Time Resolved Measurements Which Isolate the Mechanisms Responsible for Terahertz Glory Scattering from Dielectric Spheres," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 2, pp. 269-272, 12. Jan. 1998.
- [12] J. Hawkes, and I. Latimer, *Lasers Theory and Practice* (Prentice hall international (UK) limited, UK, 1995), Chapter 4.

Imaging with terahertz electromagnetic pulses

Seung Jae Oh, Chul Kang, and Joo-Hiuk Son[†]

University of Seoul, Department of Physics Siripdae-gil 13(90 Cheonnong-dong), Dongdaemun-ku, Seoul 130-743, KOREA
[†]*E-mail: joohiuk@uos.ac.kr*

(Received July 22, 2003, Revised manuscript January 2, 2004)

Images were acquired by the modulation of terahertz electromagnetic signals and compared by modulation frequencies. For the real-time acquisition of images a fast scanning method has been adopted utilizing a galvanometer. The acquired time domain waveforms were transformed into frequency domain data by fast Fourier transformations (FFT). We chose some frequency components to compare the resolution of images. The beam profiles at the focal position were measured by a knife-edge technique. Beam diameter was shown to decrease as the frequency increased. By scanning one- and two-dimensional samples a significant image enhancement was observed with the frequency increment. A nondestructive imaging system using THz electromagnetic pulses was also demonstrated.

OCIS Codes : 100.0100, 110.2960, 110.4100, 300.6380.