

Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Imaging using Compact Fiber-coupled Terahertz Modules

Young-Jong Yoon^{1,2}, Namje Kim¹, Han-Cheol Ryu³, Kiwon Moon¹, Jun-Hwan Shin^{1,2},
Sang-Pil Han^{1,2†}, and Kyung Hyun Park^{1,2}

¹THz Photonics Creative Research Center, ETRI, Daejeon 305-700, Korea

²School of Advanced Device Technology, UST, Daejeon 305-350, Korea

³Department of Car Mechatronics, Sahmyook University, Seoul 139-742, Korea

(Received February 3, 2014; Revised manuscript February 24, 2014; Accepted February 24, 2014)

We have demonstrated a terahertz (THz) time-domain spectroscopy and imaging system using compact fiber-coupled THz modules. Using this THz spectroscopy system we have measured the absorption spectrum of water vapor in free space over 3 THz, as well as the refractive indices of various substrates such as Si, Al₂O₃, and GaAs using the transfer-function method. Through the THz imaging system we have observed a high-quality THz image of a medical knife and metal clip sample, with a resolution of 192×89 pixels using a step size of 250 μm.

Keywords: THz time domain spectroscopy(THz-TDS), Refractive index, THz image detection

OCIS codes : (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (260.5150) Photoconductivity; (120.4290) Nondestructive testing; (110.2970) Image detection systems

초소형의 광섬유 결합형 테라헤르츠 모듈을 이용한 시간영역에서의 분광 및 이미징

윤영중^{1,2} · 김남제¹ · 류한철³ · 문기원¹ · 신준환^{1,2} · 한상필^{1,2†} · 박경현^{1,2}

¹한국전자통신연구원 THz포토닉스창의연구센터
☎ 305-700 대전시 유성구 가정로 218번지

²과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과
☎ 305-350 대전시 유성구 가정로 217번지

³삼육대학교 메카트로닉스학과
☎ 139-742 서울시 노원구 화랑로 815번지

(2014년 2월 3일 받음, 2014년 2월 24일 수정본 받음, 2014년 2월 24일 게재 확정)

본 논문에서는 초소형의 광섬유 결합형 테라헤르츠 모듈을 이용하여 테라헤르츠 시간영역 분광 및 영상 시스템을 구성하였다. 구성된 THz 분광 시스템을 이용하여 3 THz 이상의 자유공간에 분포되어 있는 수분의 고유 흡수 스펙트럼을 관측하였고 테라헤르츠 대역에서의 Si, Al₂O₃, GaAs기판에 대한 굴절률을 측정하였으며 측정을 위해 다중 반사를 고려한 전달 함수를 이용한 굴절률 측정 방법을 이용하였다. 또한, 테라헤르츠 영상 시스템을 이용하여 의료용 칼과 클립을 측정하여 250 μm 간격으로 192 × 89 픽셀의 영상을 얻었다.

Keywords: 테라헤르츠 시간영역 분광 시스템 (THz-TDS), 굴절률, THz 영상 측정

OCIS codes : (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (260.5150) Photoconductivity; (120.4290) Nondestructive testing; (110.2970) Image detection systems

†E-mail: sphan@etri.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

테라헤르츠(THz) 파는 전자기파 스펙트럼 영역에서 마이크로웨이브와 적외선 영역 사이의 일반적으로 0.1~10 THz에 해당하는 파를 말하며, 적외선이 가지는 직진성과 마이크로웨이브가 가지는 다양한 비전도성 물질(옷, 종이, 나무, 플라스틱, 벽돌) 등을 투과하는 독특한 특성을 가진다. 이 영역은 기술적 한계에 의해 전자기파 스펙트럼 중 가장 접근하기 어려운 영역으로 알려져 왔다. 하지만 펨토초 레이저와 재료기술, 공정기술 등의 발전으로 다양한 THz 파원들이 등장하였고 이 분야는 지속적으로 발전해 왔다. 물질의 원자나 분자를 이온화시키는 X선 파는 달리 그 에너지가 4.135 meV 정도로 낮아서 투과하는 물질을 파괴시키지 않는 비이온화(non-ionizing), 비파괴 특성을 가지며 기존의 분광기법으로 탐지할 수 없는 주파수 대역에서 물질 고유의 흡수 스펙트럼, 물리적 특성을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 THz 파를 이용한 분광 및 영상 기술로 발전시켰고 기관검사, 금지약물이나 위험물에 대한 모니터링, 암세포 분별 등의 보안, 의료, 환경, 비파괴 검사 분야에 활용될 수 있는 가능성을 보여 주었다^[1].

대부분의 경우 THz 시스템은 광학계를 이용하여 구성되며 시스템의 크기가 비교적 커서 이동성이 좋지 않다. 하지만 THz 시스템의 활용도가 높아질수록 동적 환경에서 이용 가능한 THz 시스템이 필요하며 이를 위해 이동성이 좋은 소형의 THz 시스템에 대한 지속적인 연구가 진행 중이다^[2-4]. 현재 연구되는 소형의 THz 발생 및 검출 시스템들은 광섬유와 광전도 안테나가 하나의 모듈로 구성되어 있는 형태로 이동성이 좋고, 광통신용 레이저를 이용하므로 저렴하게 구성할 수 있으며 안정적으로 THz 펄스파 및 연속파 발생 및 검출이 가능하다^[3-8].

본 연구에서는 먼저, 초소형 크기의 광섬유 결합형 THz 발생 및 검출 모듈을 자체 제작한 후, 이를 이용하여 THz 분광 및 영상 시스템을 구축하였다. 그리고 이를 이용하여 시료 Al₂O₃ 기판의 굴절률 및 흡수율을 Newton-Raphson 방법을 이용하여 측정하였고 또한 의료용 칼과 클립의 2차원 스캔을 통한 THz 이미지를 측정하였다.

II. 광섬유 결합형 THz 모듈 및 분광 시스템

그림 1은 자체 개발된 THz파 발생 및 검출기 모듈이다. 모은 THz 발생 및 검출에 필요한 광전도 안테나와 서브 마운트, 모듈 하우징, 고저항 실리콘렌즈, 단일모드 광섬유, 동축 케이블이 하나의 모듈로 구성되어 있다. 모듈에 이용된 광전도 안테나는 InP 기판 위에 Be가 도핑된 InGaAs층을 1.2 μm 두께로 성장시켜 활성층으로 이용하였고 광전도층의 운반자 수명시간은 대략 1.7 ps 이다. 안테나는 log-spiral 형태이며 안테나 중앙에 10 × 10 μm² 크기의 활성층이 있다. 서브마운트는 광전도 안테나를 지지하는 역할로 광전도 안테나에 외부 바이어스를 인가하고 레이저 펄스가 안테나의 활성영역

에 도달할 수 있도록 설계하였다. 모듈에서는 광전류의 증가로 인한 열을 효과적으로 방출하기 위해 방열효율이 우수한 Aluminium nitride(AlN) 서브마운트를 이용하였고^[3], 고저항 실리콘 렌즈를 이용하여 자유공간으로 방사되는 THz파의 손실을 줄이고 원하는 방향으로 THz 파가 진행되도록 하였다. 모듈 하우징을 이용하여 구성요소들을 고정시켰으며, 완성된 모듈의 부피는 0.7 cc 이다.

위와 같은 초소형의 광섬유 결합형 THz 모듈을 이용한 THz-TDS 시스템은 그림 2와 같다. 본 시스템은 중심파장이 1.55 μm이며 펄스폭이 70 fs, 반복율이 100 MHz 인 펨토초 레이저와, 단일모드 광섬유(SMF; single-mode fiber), 분산보상 광섬유(DCF; dispersion compensated fiber), 1×2 광분배기(1×2 splitter), THz 모듈, 시간지연기(delay line), 함수발생기(function generator), Lock-in 증폭기(lock-in amplifier)로 구성되어 있으며, 두 개의 THz 모듈을 각각 THz 발생기와 검출기로 이용하였다. 펨토초 레이저에서 발생된 펄스를 광섬유에 입사한다. 입사된 1.55 μm 파장의 광은 광섬유를 진행

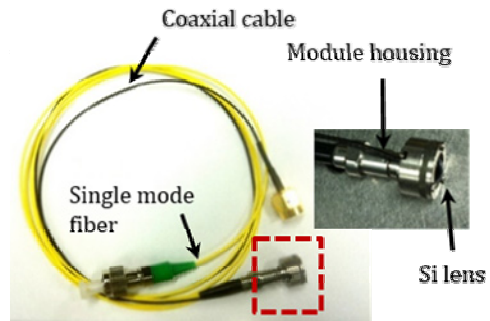
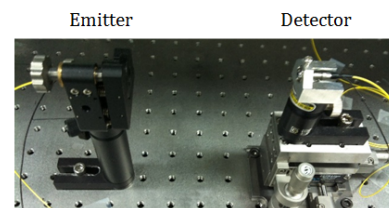
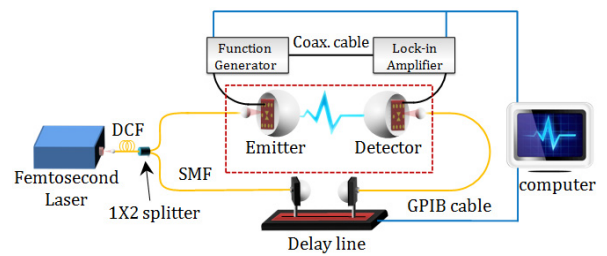


FIG. 1. Photograph of a compact fiber-coupled THz module.



(a)

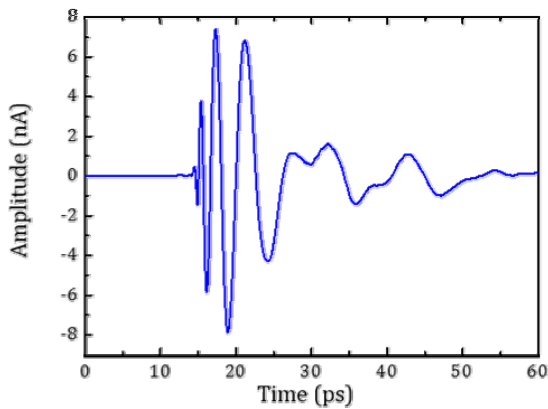


(b)

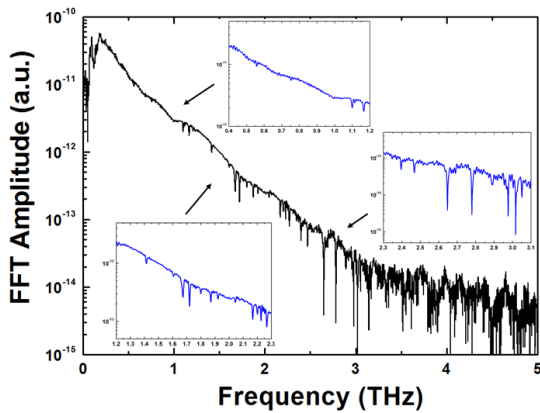
FIG. 2. (a) Photograph of THz emitter and detector modules and (b) THz time-domain spectroscopy setup using the THz modules (DCF: dispersion compensated fiber, SMF: single-mode fiber, GPIB: general-purpose interface bus).

할 때 분산이 발생하므로 분산 보상 광섬유를 이용하여 레이저 펄스의 분산을 최소화하였다. 실제 시스템에서는 6 m 길이의 광섬유와 광학계 등에서 발생하는 분산을 보상하기 위하여 1.3 m 길이의 분산보상 광섬유를 장착하였다. 입사된 펄토초 펄스가 1×2 광분배기를 지나면 두 개의 광으로 나누고 각각 THz 발생기와 검출기에 전달시켜 내부에 있는 광전도안테나의 활성층을 여기시킨다. THz 발생기에서는 여기된 광전도안테나에 외부 바이어스를 인가하여 THz 펄스를 생성시키고 THz 검출기에서는 Lock-in 증폭기를 이용하여 자유공간을 통해 전달된 THz 펄스를 호모다인 검파방법으로 측정하였다. 또한 계측 장비의 작동 및 데이터 수집은 상용 소프트웨어인 Labview(National Instruments Co.) 를 이용하였다.

THz-TDS 시스템으로 자유공간에서 측정한 THz 펄스파의 실험 결과를 그림 3에 나타내었다. 발생기와 검출기 사이의 자유공간의 거리는 70 mm 이며, 발생기와 검출기에 도달한 펄스파의 세기는 각각 평균 11 dBm, 8 dBm이다. THz 발생기에 진폭 6.5V의 사인파를 바이어스로 인가했으며 이 때 발생한 광전류는 약 0.5 mA 이다. 그림 3(a)는 광섬유 결합형 THz-TDS 시스템을 이용하여 자유공간에서 측정한 시간영역에서의 THz 의 신호이다. 측정 신호에서 나타나는 다중



(a)



(b)

FIG. 3. (a) Time domain trace of a THz electric field and (b) its FFT amplitude spectrum in free space.

피크는 log-spiral 안테나에서 나타나는 특징이며, 신호 지속시간은 약 40 ps이다. 그림 3(b)는 측정된 시간영역에서의 결과를 Fast Fourier Transform(FFT)한 자유공간에서의 THz 주파수 스펙트럼이다. 이 결과에서 보면 수증기 분자에 포함되어 있는 하이드록시기(-OH)에 기인된 특정 주파수에서 흡수 피크들을 발견할 수 있다. 이 흡수 피크들이 발견된 주파수는 0.56, 0.75, 0.98, 1.11, 1.16, 1.20, 1.23, 1.41, 1.60, 1.67, 1.71, 1.80, 1.87, 1.92, 2.04, 2.12, 2.16, 2.20, 2.22, 2.26, 2.39, 2.46, 2.64, 2.77, 2.89, 2.97, 3.01, 3.05 THz로 상온의 자유공간에 존재하는 수분의 흡수 주파수와 일치하였다^{9, 10}.

III. THz 분광 및 이미징 실험결과

3.1. Al₂O₃의 굴절률 측정

그림 4는 THz 발생기와 검출기 사이에 시료를 두었을 때 나타나는 THz 파의 경로이다. 매질1과 매질3은 자유공간이며 매질2는 시료이다. 발생기에서 발생한 THz 펄스를 시료에 입사시키면 자유공간에서 시료를 통과하여 검출기에 도달한다. THz 펄스가 각 매질을 지날 때마다 펄스의 일부는 반사하는 특성으로 인해 시료 내부에서 다중 반사가 일어난다. 광섬유 결합형 THz 모듈에서 발생한 THz 펄스의 신호 지속시간은 약 40 ps이며 이는 반도체 기판과 같은 얇은 두께의 시료를 측정할 경우 시료에서 반사되는 시간이 짧아 신호 지속시간 동안 본신호와 반사된 신호가 함께 측정된다. 그러므로 얇은 두께의 시료의 굴절률 측정 시 반드시 다중 반사가 고려되어야 한다.

$E_o(\omega)$ 는 시료에 입사되기 전 발생기에서 발생한 THz 펄스 신호의 진폭이며 $E_t(\omega)$ 는 시료를 통과하여 검출기에서 측정된 THz 신호의 진폭으로 시료에서 발생한 다중 반사가 포함된 결과로 측정된다. 측정된 $E_t(\omega)$ 와 $E_o(\omega)$ 를 통해 시료의 투과계수 $T_{meas}(\tilde{n}_2, \omega)$ 를 구할 수 있으며, 투과계수에 대한

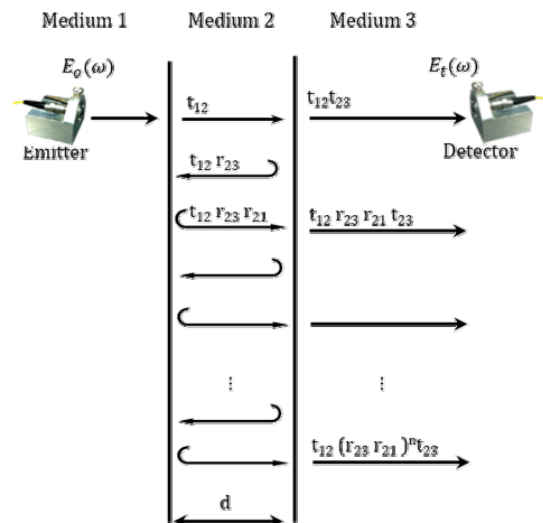


FIG. 4. Schematic diagram of the propagation of a THz pulse.

전달함수 $T(\tilde{n}_2, \omega)$ 는 다중 반사에 의한 Fabry-Perot 효과를 고려하여 식 (1)와 같이 정의된다.

$$T(\tilde{n}_2, \omega) = \frac{E_t(\omega)}{E_o(\omega)} = \frac{t_{12}t_{23}e^{i(\tilde{n}_2-1)\omega d/c}}{1-r_{12}r_{23}e^{2i\tilde{n}_2\omega d/c}} \quad (1)$$

여기서 r_{12} 는 매질 1과 2사이의 반사 진폭 계수, t_{12} 는 매질 1과 2사이의 투과 진폭 계수이며, c 는 광속이다. 반사 진폭 계수와 투과 진폭 계수는 각각 식 (2)과 (3)로 정의한다.

$$r_{12} = \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_2}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} \quad (2)$$

$$t_{12} = \frac{2\tilde{n}_1}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} \quad (3)$$

\tilde{n} 은 주파수에 따른 시료의 복소굴절률이며, ω 는 각주파수 [rad/s], d 는 시료의 두께다. 실험에 사용한 시료는 Si(100), $Al_2O_3(0001)$, GaAs(100) 기판이며, 시료의 두께는 각각 300 μm , 480 μm , 350 μm 이다. 굴절률의 계산은 Newton-Raphson 법을 이용하였다^[11, 12]. $T(\tilde{n}_2, \omega)$ 와 $T_{meas}(\tilde{n}_2, \omega)$ 의 차를 라 정의하고 다음 식과 같이 정의된다.

$$\sigma_p = \ln(|T(\tilde{n}_2, \omega)|) - \ln(|T_{meas}(\tilde{n}_2, \omega)|) \quad (4)$$

그림 5(a)는 자유공간과 시료를 지나는 THz 펄스의 시간영역에서의 신호를 나타낸다. 측정된 THz 신호의 길이는 약 40 ps로 신호에서 발생하는 다중 반사가 본 신호에 묻히기에 충분히 긴 길이이고, 펄스가 시료를 통과할 때 자유공간에서의 속도보다 줄어들어 시간 지연이 발생하였다. 이렇게 발생한 시간 지연을 통해 얻어진 시간영역에서의 굴절률을 Newton-Raphson법의 초기값으로 설정하였고, 시간영역 신호를 각각 FFT하여 $E_o(\omega)$ 와 $E_t(\omega)$ 를 구하였다. 또한, σ_p 의 허용오차는 10^{-7} 이며 σ_p 의 결과가 허용오차보다 클 경우 식 (5)과 같이 초기값에서 분함수(5)와 접선의 기울기를 나눈 값의 차를 이용하여 굴절률을 계산하였다.

$$\tilde{n}_2(i+1) = \tilde{n}_2(i) - \frac{\sigma_p}{\sigma_p'} \quad (5)$$

위와 같은 방법으로 구한 굴절률은 그림 5(b)에 나타내었다. Si 기판의 경우 약 3.41-3.42 범위의 굴절률로 측정되었고 Al_2O_3 기판의 경우 3.09-3.11로 측정되었으며 GaAs 기판의 경우 3.72-3.74 범위의 굴절률이 측정되었다. 높은 주파수 영역에 비하여 낮은 주파수 영역에서 측정된 굴절률이 상대적으로 일정하지 않은 것으로 측정되었다. 낮은 주파수 대역인, 파장보다 얇은 두께의 시료에서는 THz 파가 투과된 양이 적어 측정된 결과가 일정하지 않은 것으로 나타났으며,

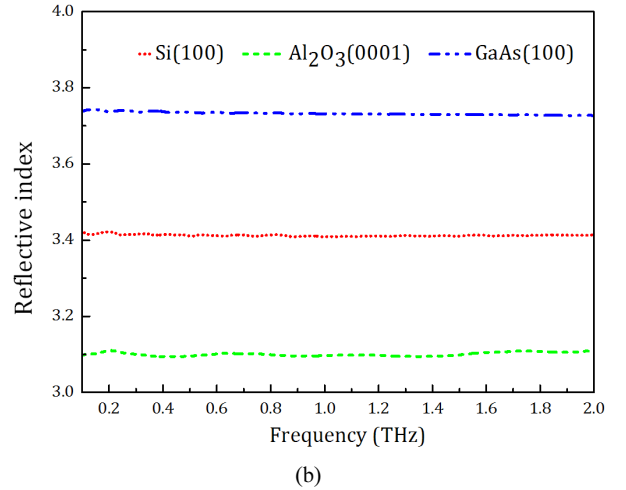
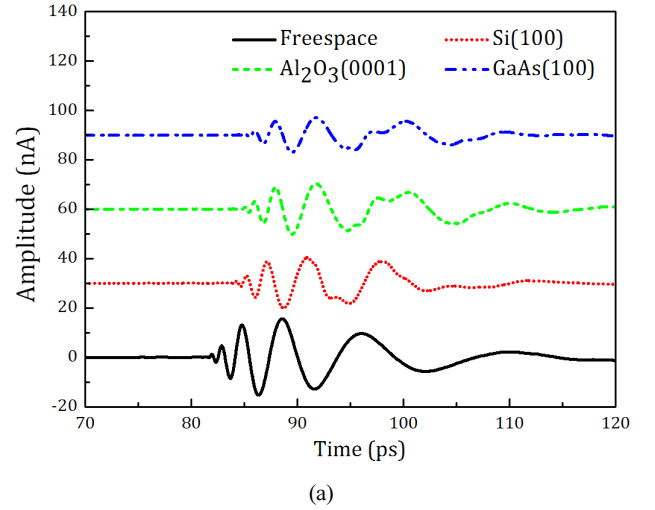
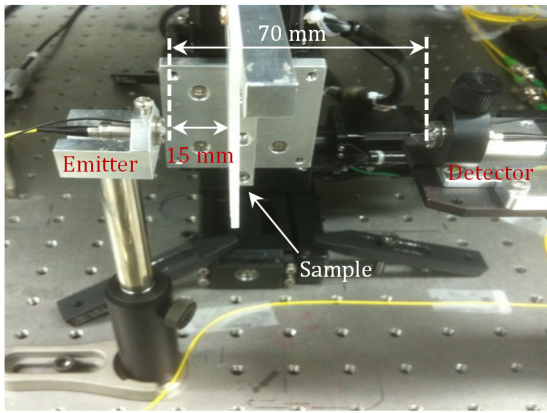


FIG. 5. (a) Scanned time domain THz signal of free space (black), 300 μm thick Si (red), 480 μm thick Al_2O_3 (green) and 350 μm thick GaAs (blue) (b) Measured reflective index of the Si, Al_2O_3 and GaAs.

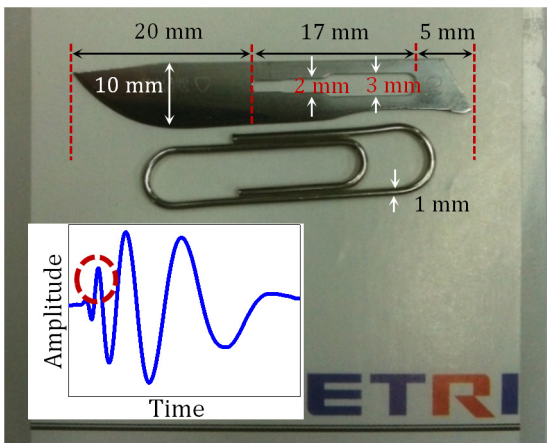
이렇게 변하는 현상은 THz 파의 파장보다 두꺼운 시료를 이용하거나 시료에서 반사된 신호를 추가적으로 측정하여 보정을 해주면 억제시킬 수 있다^[13]. 이 결과는 기존의 알려진 바와 비슷한 결과를 가지며^[14, 15], 이 결과는 THz 모듈을 이용한 분광연구의 응용가능성을 보여준다.

3.2. 테라헤르츠 영상

THz 파의 투과 특성을 이용한 영상을 얻기 위해 그림 6(a)와 같이 초소형 THz 모듈을 이용한 영상 시스템을 구성하였다. 이는 앞서 분광 시스템과 비교하여 THz 파의 발생기와 측정기는 동일하나 시료의 2차원 이미지를 얻기 위하여 시료를 2차원으로 움직일 수 있는 x-y축 스테이지에 위치시켜 실험을 실시하였다. THz 파가 금속을 투과하지 못하므로 THz 시간 영역 신호의 피크에서의 샘플이 있는 곳과 없는 곳의 진폭 변화로 샘플의 영상을 측정하였다^[17]. 측정에 사용된 log-spiral 안테나는 다중 피크 특성이 나타나며 앞쪽 피크



(a)



(b)

FIG. 6. Photograph of (a) THz imaging system and (b) a medical knife and a clip with the inset showing the time delay position used to measure THz imaging.

에 고 주파수 성분이 모여 있는 특성이 있다. 그러므로 영상의 해상도를 높이고 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 확보하기 위해 그림 6(b)와 같이 두 번째 피크 지점에서 영상을 측정하였다. 측정에 사용된 샘플은 그림 6(b)와 같이 의료용 칼과 클립이며 테플론 지지대에 시료를 두고 그 위에 종이로 덮어 시료가 보이지 않도록 하였다. 의료용 칼은 가로, 세로 각각 45 mm, 10 mm 이고 칼은 중간 부분에 세로로 2-3 mm의 구멍을 가지고 있으며 클립은 가로, 세로, 두께 각각 33 mm, 8mm, 1 mm 이다. THz 펄스의 발생기와 검출기는 70 mm이며 발생기에서부터 시료까지 THz 발생기에 사용한 실리콘 렌즈의 초점거리를 고려하여 15 mm 의 거리를 유지하였다. 시료를 x-y 축 스테이지에 고정 시켜 250 μ m 간격으로 192 \times 89 픽셀을 스캔하였다.

그림 7(a)는 샘플의 영상 결과이다. 결과 이미지의 SNR은 약 130(21.1dB)이며, 샘플의 사이즈가 동일하게 측정 되었으며, 측정된 이미지에서 의료용 칼의 구멍과 클립의 형태가 정확히 드러나 실제와 유사한 영상 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7(b)는 구간 A-B의 프로파일이다. THz 파가 투과될 때 금속 면의 두께가 두꺼울수록 THz 파의 투과량은 줄어들고

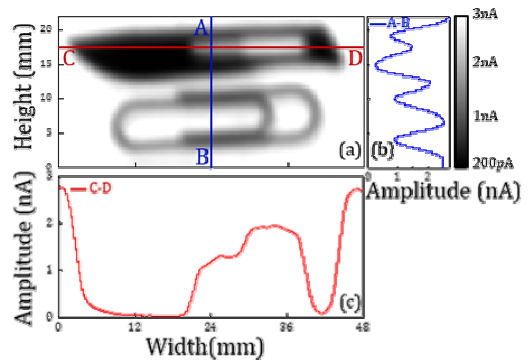


FIG. 7. (a) Raw THz images of a medical knife and a clip, (b) image profile of a line segment (A-B), and (c) image profile of a line segment (C-D).

얇을수록 투과량이 높아짐을 볼 수 있다. 이는 THz 파의 크기가 측정된 금속의 두께보다 커 금속의 두께에 따라 THz 파 투과량이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 그림 7(c)는 구간 C-D의 프로파일이다. 칼의 금속면 부분이 THz 파의 크기보다 넓어 THz 파가 투과되지 않았으며, 칼의 구멍 부분에서는 THz 파가 일부 투과됨을 볼 수 있다. 금속면의 넓이와 두께에 따라 THz 파의 투과량이 다르게 나타났지만 샘플의 유무를 충분히 구별할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 THz 파를 이용하여 숨어 있는 물체의 탐지가 가능하며, 선명하게 영상물을 측정할 수 있음을 보여준다. 그리고 THz 파를 이용한 영상연구에 초소형의 THz 모듈의 응용가능성을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 초소형 크기의 광섬유 결합형 THz 모듈을 이용하여 THz-TDS 및 영상실험을 수행하였으며 3 THz이상의 수분에 기반한 THz 흡수 피크를 구별하였다. 이 THz-TDS 시스템을 이용하여 THz 대역에서의 Al₂O₃의 굴절률과 칼과 클립의 영상을 측정하였다. 굴절률 측정시 신호지속시간 동안 반사신호가 함께 측정되는 현상으로 인해 다중 반사를 고려하였으며, Newton-Raphson 법을 이용하여 굴절률을 구하였다. 각각 측정된 굴절률은 Si 기판의 경우 약 3.41-3.42, Al₂O₃ 기판의 경우 3.09-3.11, GaAs 기판의 경우 3.72-3.74 범위로 측정되어 기존의 알려진 바와 비슷한 결과로 나타남을 확인할 수 있었다. 영상 실험을 통해 의료용 칼과 클립이 실제와 비슷하게 측정되었다. 이러한 결과는 초소형의 THz 모듈의 분광 및 영상 측정에 대한 가능성을 보여주고 있다.

앞으로 THz 분야의 응용은 더욱 커질 것이라 예상되며 그와 더불어 소형의 THz 발생 시스템이 요구될 것이다. 본 논문은 초소형의 광섬유 결합형 THz 모듈을 이용한 결과라는데 의미가 있으며 다양한 연구분야에서의 초소형 모듈을 이용한 THz 파의 응용가능성을 보였다. 그리고 계속해서 발전할 소형의 THz 발생 및 검출분야에 참고자료가 될 것으로 기대된다.

References

1. M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photon.* **1**, 97-105 (2007).
2. B. Sartorius, H. Roehle, H. Künzel, J. Böttcher, M. Schlak, D. Stanze, H. Venghaus, and M. Schell, "All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths," *Opt. Express* **16**, 9565-9570 (2008).
3. S.-P. Han, N. Kim, H. Ko, H.-C. Ryu, J.-W. Park, Y.-J. Yoon, J.-H. Shin, D. H. Lee, S.-H. Park, S.-H. Moon, S.-W. Choi, H. S. Chun, and K. H. Park, "Compact fiber-pigtailed InGaAs photoconductive antenna module for terahertz-wave generation and detection," *Opt. Express* **20**, 18432-18439 (2012).
4. S.-P. Han, H. Ko, N. Kim, H.-C. Ryu, C. W. Lee, Y. A. Leem, D. Lee, M. Y. Jeon, S. K. Noh, H. S. Chun, and K. H. Park, "Optical fiber-coupled InGaAs-based terahertz time-domain spectroscopy system," *Opt. Lett.* **36**, 3094-3096 (2011).
5. N. Kim, Y. A. Leem, H. Ko, M. Y. Jeon, C. W. Lee, S. P. Han, D. Lee, and K. H. Park, "Widely tunable 1.55 μm detuned dual mode laser diode for compact continuous-wave THz emitter," *ETRI J.* **33**, 810-813 (2011).
6. N. Kim, S.-P. Han, H. Ko, Y. A. Leem, H.-C. Ryu, C. W. Lee, D. Lee, M. Y. Jeon, S. K. Noh, and K. H. Park, "Tunable continuous-wave terahertz generation/detection with compact 1.55 μm detuned dual-mode laser diode and InGaAs based photomixer," *Opt. Express* **19**, 15397-15403 (2011).
7. N. Kim, H.-C. Ryu, D. Lee, S.-P. Han, H. Ko, K. Moon, J.-W. Park, M. Y. Jeon, and K. H. Park, "Monolithically integrated optical beat sources toward a single-chip broadband terahertz emitter," *Laser Physics Letters* **10**, 085805 (2013).
8. K. H. Park, N. Kim, H. Ko, H.-C. Ryu, J.-W. Park, S.-P. Han, and M. Y. Jeon, "Portable terahertz spectrometer with InP related semiconductor photonic devices," *Proc. SPIE* **8261**, 826103 (2012).
9. A. Danylov, "THz laboratory measurements of atmospheric absorption between 6% and 52% relative humidity," Submillimeter-Wave Technology Laboratory University of Massachusetts Lowell, <http://stl.uml.edu> (2006).
10. X. Xin, H. Altan, A. Saint, D. Matten, and R. R. Alfano, "Terahertz absorption spectrum of para and ortho water vapors at different humidities at room temperature," *J. Appl. Phys.* **100**, 094905-094904 (2006).
11. L. Duvillaret, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **2**, 739-746 (1996).
12. D.-x. Zhou, E. P. J. Parrott, D. J. Paul, and J. A. Zeitler "Determination of complex refractive index of thin metal films from terahertz time-domain spectroscopy," *J. Appl. Phys.* **104**, 053110-053119 (2008).
13. A. L. Chung, Ph. D. Thesis, University of Southampton (2012), p. 63.
14. D. Grischkowsky, S. Keiding, M. v. Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B* **7**, 2006-2015 (1990).
15. L. Duvillaret, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **2**, 739-746 (1996).
16. M. Herrmann, M. Tani, and K. Sakai, "Display modes in time-resolved terahertz imaging," *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 6254 (2000).