

## Characterization of Optical Properties of Materials in D-band Using Sub-THz Time-domain Spectroscopy

Seung Jae Oh<sup>1</sup>, Sanggu Lee<sup>1</sup>, Young Bin Ji<sup>2</sup>, Hyeon Sang Bark<sup>2</sup>, Lan-Hee Yang<sup>1</sup>, and Inhee Maeng<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>*YUHS-KRIBB Medical Convergence Research Institute, College of Medicine, Yonsei University, Seoul 03722, Korea*

<sup>2</sup>*Division of Applied Photonics System Research, Advanced Photonics Research Institute (APRI),*

*Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju 61005, Korea*

(Received July 14, 2025; Revised August 14, 2025; Accepted August 18, 2025; Published online October 1, 2025)

Sub-THz (terahertz,  $10^{12}$  Hz) time-domain spectroscopy (TDS) system was developed to analyze the optical properties of materials within the D-band (110–170 GHz) frequency range. By directly measuring both the amplitude and phase of the electric field in the time domain, the complex refractive indices and absorption coefficients of polytetrafluoroethylene, crystalline quartz, and sapphire samples were extracted. The TDS system provides several advantages, including broad bandwidth, fast acquisition, and the capability to determine complex dielectric properties without the need for reference samples. These features highlight its potential for applications in telecommunications, biosensing, and semiconductor inspection.

**Keywords:** D-band, Spectroscopy, Sub-THz

**OCIS codes:** (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (320.7150) Ultrafast spectroscopy

## Sub-THz 시간축 분광 시스템을 이용한 D-band 대역 분광연구

오승재<sup>1</sup> · 이상구<sup>1</sup> · 지영빈<sup>2</sup> · 박현상<sup>2</sup> · 양난희<sup>1</sup> · 맹인희<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 의과대학 연의-생명공학연 메디컬융합연구소

Ⓢ 03722 서울특별시 서대문구 연세로 50-1

<sup>2</sup>광주과학기술원 고등광기술연구원

Ⓢ 61005 광주광역시 북구 첨단과기로 123

(2025년 7월 14일 받음, 2025년 8월 14일 수정본 받음, 2025년 8월 18일 게재 확정, 2025년 10월 1일 온라인 게재)

본 연구에서는 D-band (110-170 GHz) 대역에서 물질의 광학적 특성을 분석하기 위해 펄스 레이저 기반의 sub-THz (terahertz,  $10^{12}$  Hz) 시간축 분광 시스템을 개발하였다. 시간 영역에서 전기장의 진폭과 위상을 직접 측정하여 THz 광학 부품으로 사용되는 대표적인 재료인 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE), 결정질 석영(crystalline quartz)과 사파이어( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 샘플의 굴절률과 흡수계수를 추출하였다. 본 시스템은 시간 영역에서 넓은 대역폭, 빠른 측정 속도, 기준 시편 없이도 복소 유전 특성을 측정할 수 있는 기능 등 여러 장점을 가지고 있다. 향후 통신, 바이오센서, 반도체 검사 등 다양한 분야에 적용 가능성을 제시한다.

**Keywords:** D-band, 분광학, Sub-THz

**OCIS codes:** (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (320.7150) Ultrafast spectroscopy

<sup>†</sup>Corresponding author: [inheem@yonsei.ac.kr](mailto:inheem@yonsei.ac.kr), ORCID: 0000-0001-7499-8588

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서 론

### 1.1. Sub-THz 대역의 다양한 가능성

테라헤르츠(terahertz,  $10^{12}$  Hz; THz) 대역(0.1-10 THz)은 전파와 광파의 경계 영역에 위치한 고유의 전자기파 영역으로, 최근 다양한 과학 및 산업 분야에서 활용도가 빠르게 확장되고 있다<sup>[1-3]</sup>. THz파는 비이온화 방사선으로 생체 안전성이 뛰어나며, 분자 구조의 진동, 회전 및 집단 운동 모드에 민감하여 비파괴적이고 정밀한 물질 분석에 적합하다. 이러한 장점 덕분에 테라헤르츠 기술은 생명과학, 재료 과학, 비파괴 검사, 반도체 공정 제어, 보안 시스템, 식품 검사, 통신 등 다양한 분야에서 핵심적인 진단 및 측정 도구로 주목받고 있다. 특히 최근 차세대 6G 이동통신 시스템 개발에 있어 THz 대역은 초고속, 초저지연, 초대용량 전송을 위한 유망한 주파수 자원으로 적극 검토되고 있다<sup>[4,5]</sup>.

이러한 테라헤르츠 응용 영역 중에서도 sub-THz (0.1-0.3 THz) 영역에 포함되는 D-band (110-170 GHz)는 기술적, 산업적 관점에서 매우 중요한 위치를 차지한다<sup>[6,7]</sup>. D-band는 상대적으로 낮은 전송 손실도와 넓은 주파수 대역폭을 동시에 제공하며, 시스템 구현 면에서도 현실적으로 용이하여 6G 통신 후보 대역뿐만 아니라 고분해능 거리 측정, 반도체 공정 모니터링, 생체조직 분석, 수분 함량 측정 등의 분야에서도 활용 가능성이 매우 높다<sup>[8,9]</sup>. D-band 영역의 주파수 특성 측정에서 현재까지 가장 널리 사용되는 방법은 vector network analyzer (VNA) 기반의 연속파 분광법이다<sup>[10]</sup>. VNA 방식은 안정적이고 정밀한 S-파라미터 측정이 가능하다는 장점을 지니지만, 분광 측정 시 몇 가지 기술적 한계가 존재한다. 첫째, VNA 기반 시스템은 주파수 가변 소스와 믹서를 사용하여 좁은 주파수 대역을 순차적으로 스캔하는 방식으로 측정이 이뤄져 전체 스펙트럼 획득에 시간이 오래 걸린다. 둘째, 시스템이 복잡하고 고가이며, 고주파 대역으로 갈수록 측정 안정성 유지가 어렵다. 셋째, 위상 보정 및 기준 설정이 까다로워 물질의 복소 유전율 및 광학상수를 직접 계산하는 데 제약이 따른다. 넷째, 전송선로 기반 측정 구조는 샘플의 크기, 위치 정렬, 매칭 상태에 민감하여 실제 물질의 본질적인 특성을 정확히 반영하기 어렵다. 특히 반도체 박막, 액체, 생체 조직 등 소형 시료 측정 시 정밀도가 떨어지는 문제가 있다.

### 1.2. Sub-THz 시간축 분광법

이에 본 연구에서는 D-band 측정을 위한 VNA 기반의 연속파 분광법 한계를 극복하고 보다 정밀한 분광 측정을 가능하게 하기 위해 THz 시간축 분광(time-domain spectroscopy, TDS) 시스템을 이용하고자 한다. TDS 방식은 펄스 레이저 기반의 초단 펄스를 이용하여 THz파를 발생시켜 시간 영역에서 전기장 파형을 직접 측정하는 방법을 사용한다<sup>[11,12]</sup>.

측정된 시간축 정보를 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)을 통해 주파수 영역 정보로 변환한다. 이 방식은 단일 측정만으로 넓은 대역폭을 빠르게 획득할 수 있으며, 무엇보다도 전기장의 진폭뿐만 아니라 위상 정보를 직접 측정할 수 있다는 중요한 장점을 가진다<sup>[13,14]</sup>. 이러한 위상 정보의 획득은 물질의 광학상수(복소 굴절률  $\tilde{n}(\omega)$ , 흡수계수  $\alpha(\omega)$ 와 유전상수  $\epsilon(\omega)$ )를 기준 샘플 없이도 추출이 용이하도록 하여, 정밀한 분광 분석 정보를 제공한다.

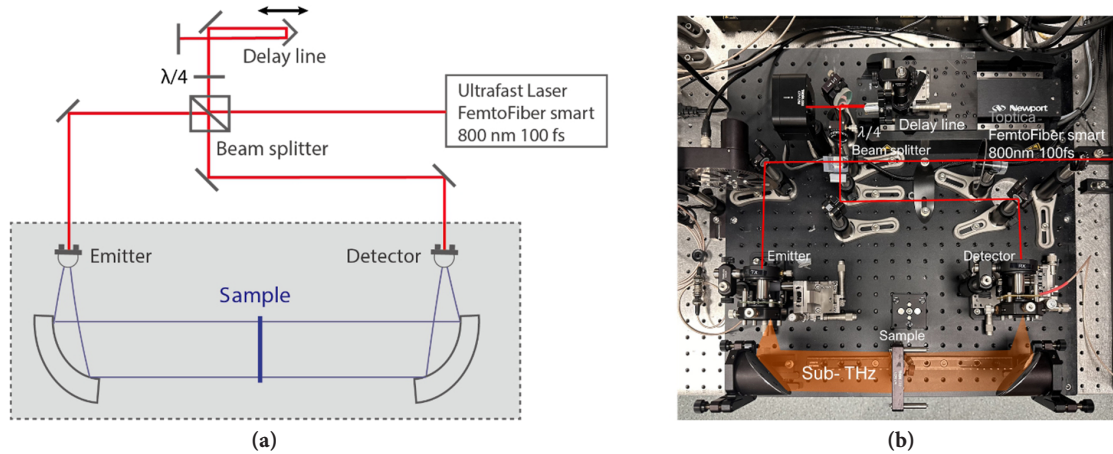
지금까지 대부분의 THz-TDS 시스템은 0.3-3 THz의 중·고주파 대역에서 더 넓은 스펙트럼을 획득하기 위한 목적으로 개발되어 왔다. 최근에는 5 THz 영역에 이르는 광전도 안테나(photoconductive antenna, PCA)가 개발되어 고해상도의 THz 영상을 획득하는 데 사용되고 있다. 그러나 sub-THz 영역의 D-band에서 시간 영역 분광법을 구현하려면 몇 가지 기술적 난제가 따른다. 먼저 D-band는 파장이 수 밀리미터 수준으로 길어 기존의 THz 안테나 및 광학계 설계와 차이를 보이며, sub-THz 영역에서 PCA, 저주파수용 지연선 시스템, 고감도 검출기 개발이 필요하다. 또한 펄스 발생 효율, 안테나 임피던스 매칭, 대역폭 확보 등이 주요 설계 변수로 작용하며, 시스템의 소형화 및 신호 대 잡음비 향상 또한 중요한 과제로 남아 있다. 따라서 D-band 영역에서의 고분해능 분광을 위해 sub-THz TDS 시스템의 개발과 활용의 중요성은 날이 증가하고 있다.

본 논문은 펄스 레이저 기반의 sub-THz TDS 시스템을 개발하여 D-band 대역을 포함하는 sub-THz 영역에서 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE), 결정질 석영(crystalline quartz)과 사파이어( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 샘플의 광학상수를 측정하고, 복소 유전율 추출을 통한 분광 특성을 평가하였다. 이 시스템은 기존 VNA 기반 측정의 한계를 보완하여 복잡한 샘플 형태에서도 높은 정밀도의 물질 특성 추출을 가능하게 함으로써, 향후 6G 통신 소자, 반도체 검사, 생체분광, 고분해능 센싱 기술 등 다양한 첨단 분야에서 필수적인 분석 도구로 자리잡을 것이다.

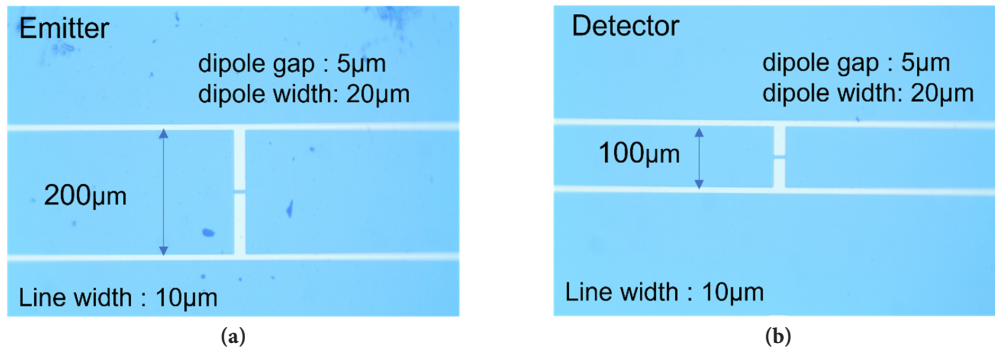
## II. 연구방법

### 2.1. Sub-THz 시간축 분광 시스템

본 연구를 위해서 제작한 sub-THz TDS 시스템은 펄스 레이저 기반의 초단 펄스광원을 중심으로 구성되었다. Sub-THz 시스템의 개략도와 제작한 시스템의 사진은 그림 1에 표시하였다. 먼저, 펄스폭이 약 100 fs 이하인 Ti:sapphire 레이저(중심파장 800 nm)는 광분할기를 통해 펌프(pump) 빔과 프로브(probe) 빔으로 분할된다. 펌프 빔은 35 V의 전압이 인가된 PCA에 조사되어 전자-홀 쌍(electron-hole pair)을 생성하고, 인가된 전기장에 의해 전하가 급격히 분리됨으로써



**Fig. 1.** (a) Scheme of the sub-THz time-domain spectroscopy system. (b) Photo of the developed system. A femtosecond laser pulse is split into two beams using a beam splitter. One of the beams is used to generate a THz pulse, and the other beam passes through a delay line and is used to detect the THz pulse via photoconductive switching technique.



**Fig. 2.** Optical microscope images of the fabricated dipole photoconductive antenna in (a) the emitter and (b) the detector. The generation and detection antennas have line spacings of 200  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$ , respectively, with identical line width (10  $\mu\text{m}$ ), dipole gap (5  $\mu\text{m}$ ), and dipole width (20  $\mu\text{m}$ ). The laser spot is focused on the gap, and a bias voltage is applied between the metallic contacts of the emitter.

순간적인 광전류가 유도된다. 이 광전류의 시간에 따른 변화율에 비례하여 THz 펄스가 방사된다. 발생된 THz 펄스는 실리콘 렌즈와 파라볼릭 미러를 통해 자유공간을 평행하게 진행하여 샘플을 투과한 뒤 검출기에 도착하는데, 검출부의 PCA 검출기로 THz 펄스와 시간 지연선(delay stage)을 통해 도달 시점이 정교하게 조정된 프로브 빔이 동시에 도달한다. 이때 프로브 빔이 안테나의 전극 간극을 단락시키고, 동시에 입사하는 THz 전자기파의 전기장이 생성된 자유 전하를 가속시켜 전류를 유도함으로써 THz 신호를 검출하게 된다<sup>[12,15]</sup>. 이 과정을 통해 시간 영역에서 THz 펄스의 파형을 직접 측정할 수 있다. THz 펄스가 진행하는 곳에 설치된 시료는 고정밀 3차원 스테이지에 장착하여 측정 위치를 정렬하였고, 측정 중 실내 온도는 21  $^{\circ}\text{C}$ , 습도는 20%로 유지하였다.

Sub-THz 시스템에 사용된 다이폴 안테나의 광학 현미경 이미지를 그림 2에 제시하였다. 다이폴 안테나는 저온 성장된 갈륨비소(low-temperature-grown GaAs, LT-GaAs) 기판

위에 200 nm 두께의 금(Au) 박막을 증착하여 형성하였으며, 줄 간격은 발생부에서 200  $\mu\text{m}$ , 검출부에서 100  $\mu\text{m}$ 로 배치하고, 줄 두께와 다이폴의 갭 길이, 다이폴의 두께는 동일하게 각각 10  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다<sup>[16-20]</sup>.

LT-GaAs는 전하 수명(carrier lifetime)이 수십~수백 ps 수준인 일반 GaAs에 비해 약 200 fs 이하로 현저히 짧은 초단 수명을 갖는다. 이러한 특성 덕분에 THz 파형 내 특정 시점의 전기장을 시간적으로 정밀하게 샘플링할 수 있어, 초고속 시간 분해능이 필요한 THz-TDS에 적합한 수신소자로 활용된다.

## 2.2. 광학상수 추출방법

Sub-THz TDS 시스템은 전기장의 진폭뿐만 아니라 위상 정보를 동시에 획득할 수 있어 기준 샘플 없이도 시료의 복소 유전율을 정밀하게 추출할 수 있다는 장점을 지닌다<sup>[12,15]</sup>. 측정된 시간영역 신호는 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환되었

으며, 이를 통해 시료 및 기준(reference) 신호의 전송 함수  $T(\omega)$ 가 계산된다. 전송 함수는 다음과 같이 정의된다<sup>[21]</sup>.

$$T(\omega) = \frac{S_{\text{SAMPLE}}(\omega)}{S_{\text{REF}}(\omega)} : \quad (1)$$

$$= T_{\text{tot}} e^{-\frac{\omega k d}{2}} e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} (n(\omega)-1)d} \equiv |R| e^{i\theta}, \quad T_{\text{tot}} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2}$$

샘플이 없을 때 측정된  $S_{\text{REF}}(\omega)$ 와 샘플을 투과한  $S_{\text{SAMPLE}}(\omega)$  신호의 진폭  $R$ 과 위상  $\theta$  정보를 통하여 샘플의 복소 굴절률  $\tilde{n}(\omega)=n(\omega)+ik(\omega)$ 을 식 (2)를 통해서 직접적으로 추출해 낼 수 있다.

$$n(\omega) = 1 + \frac{c}{\omega d} \theta, \quad k(\omega) = -\frac{c}{\omega d} \ln\left(\frac{R}{T_{\text{tot}}}\right) \quad (2)$$

이후 흡수계수  $\alpha(\omega)$ 와 유전상수  $\epsilon(\omega)$ 는 다음의 관계식을 통하여 획득한다.

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega k(\omega)}{c} \quad (3)$$

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) = \tilde{n}(\omega)^2 \quad (4)$$

### III. 연구결과

#### 3.1. Sub-THz 시간축 분광 시스템의 시간 영역 및 주파수 영역 스펙트럼 분석

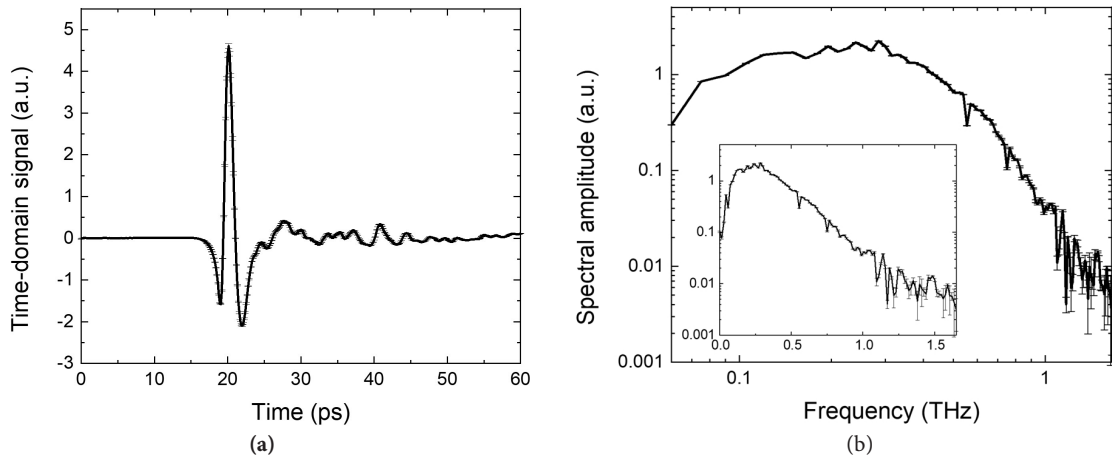
그림 3은 구성한 sub-THz 시스템을 이용하여 획득한 시간 영역과 주파수 영역에서의 THz 파형을 표시하였다. 각 신호는 3번씩 측정하여 평균을 구하였고, 표준편차를 함께 표시하였다. FFT 변환을 통해 얻은 주파수 영역 스펙트럼을 로그 스

케일로 그림 3(b)에 표시하였는데, D-band 스펙트럼 범위에서 높은 신호 대 잡음비를 보여준다. 그림 3(b) 내 별도 삽입한 그래프에 동일 데이터를 주파수축을 선형으로 변환하여 표시하였다. 주파수 영역에서의 최대값은 0.3 THz로 측정되었고, 1 THz까지의 신호를 사용하여 광학상수를 획득할 수 있었다. 실험 시의 대기 중 습도는 20% 정도였으며, 이 수분에 의해 선명한 흡수 고점이 0.55 THz와 0.75 THz에서 각각 관측되었다.

#### 3.2. 샘플별 광학상수 측정

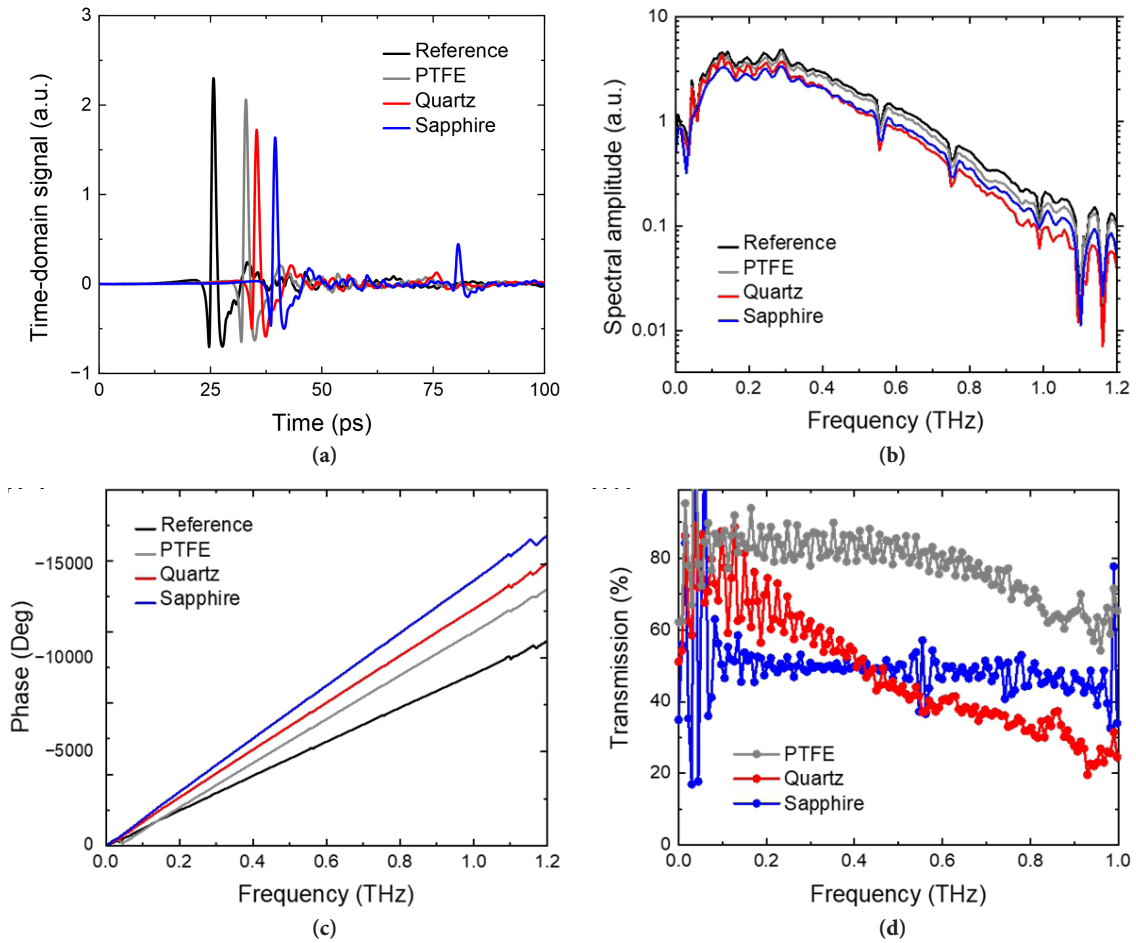
THz 광학 부품으로 사용되는 대표적인 재료인 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE), 결정질 석영(crystalline quartz)과 c-axis 사파이어( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 샘플을 준비하였다<sup>[22]</sup>. 이 샘플들은 각각 2" 지름의 디스크 형태로 두께가 일정하였는데, PTFE는 5 mm, 결정질 석영은 3 mm, 사파이어 샘플은 2 mm의 두께를 가진다. Sub-THz TDS 시스템을 이용하여 측정한 시간축 신호와 주파수축 신호, 투과도를 그림 4에 표시하였다. PTFE가 두께가 가장 두꺼운데도 시간축 상에서 7.3 ps 뒤에 투과 신호가 측정되었으며, 결정질 석영은 9.7 ps, 사파이어는 13.8 ps 뒤에서 신호가 측정되었다. 사파이어의 경우에는 샘플 내부반사에 의해 생성된 두번째 반사 신호도 선명하게 관찰되었으나 PTFE와 결정질 석영에서는 관찰되지 않았다. 투과도는 PTFE가 80%, 사파이어가 50% 정도로 균일했으며, 결정질 석영의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 80%에서 20%까지 투과도가 감소하였다. 위상은 각 샘플에서 선형적으로 증가하는 모습을 관찰할 수 있다.

측정된 sub-THz TDS 신호와 앞서 언급한 전송 함수  $T(\omega)$ 를 이용하여 샘플의 복소 굴절률  $\tilde{n}(\omega)$ , 흡수계수  $\alpha(\omega)$ 와 복소 유전상수  $\tilde{\epsilon}(\omega)$ 를 계산하여 그림 5에 표시하였다. Sub-THz 영역에서 PTFE와 결정질 석영, 사파이어 모두 일정한 값을 보



**Fig. 3.** (a) Detected THz photocurrent in the time domain. (b) Spectrum of (a) in the frequency domain. Each signal was measured three times, and the average value was calculated with the standard deviation indicated as error bars.



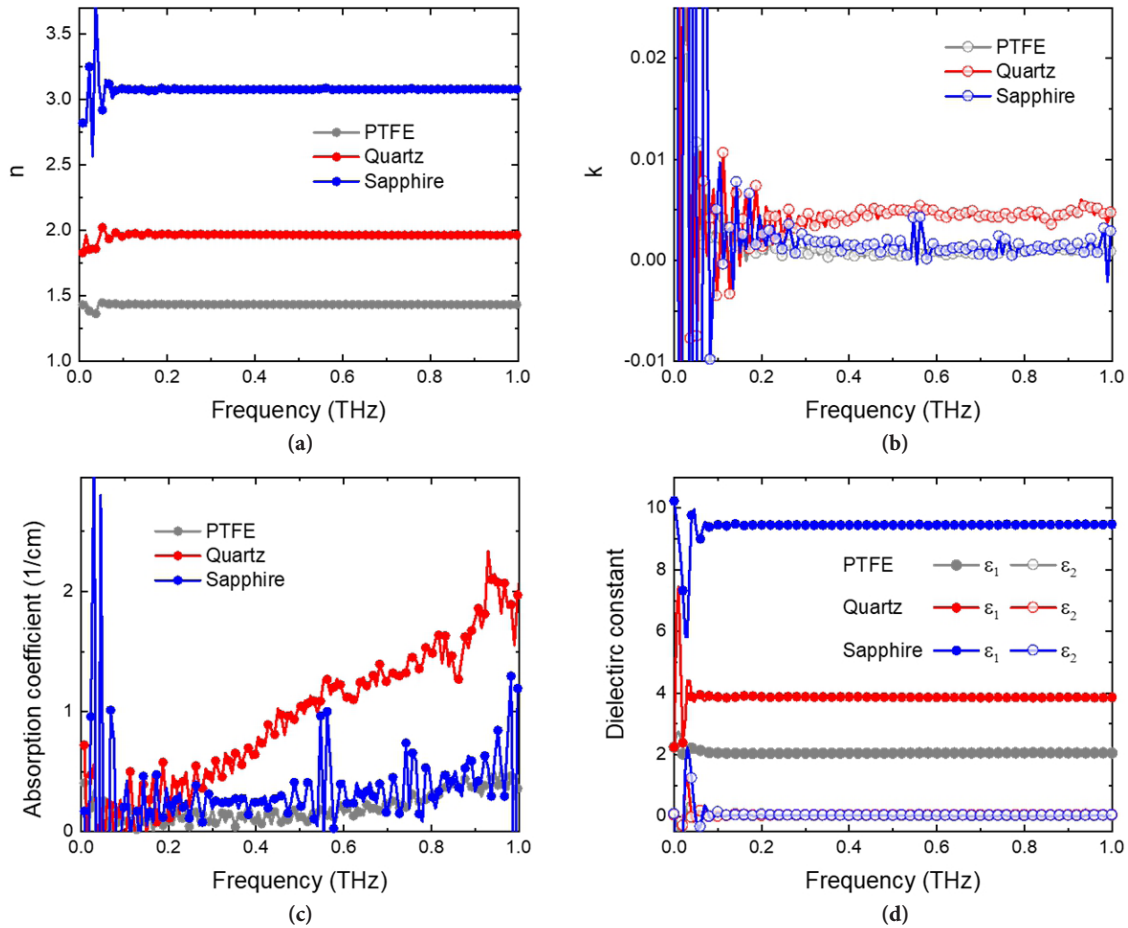


**Fig. 4.** (a) THz waveforms of reference, polytetrafluoroethylene (PTFE), quartz, and sapphire in the time domain. (b,c) Spectral amplitudes (b) and phases (c) of (a) in the frequency domain. (d) Transmissions of PTFE, quartz, and sapphire, relative to the reference.

여주었는데, 굴절률의 실수부는 각각 1.4, 1.9, 3.0으로 측정되었고, 허수부 값은 상대적으로 값이 높은 결정질 석영에서도 거의 0에 가까웠다. 이는 기존의 THz-TDS 측정값과 유사하다<sup>[23-25]</sup>. 흡수계수 또한 굴절률의 허수부와 상관관계가 있기 때문에 일반적인 유전체 물질보다 그 값이 낮다. 예시로 Sub-THz 영역의 값이 일정한 PTFE와 사파이어는  $1 \text{ cm}^{-1}$  이하의 값을, 선형적으로 증가하는 결정질 석영 또한  $2 \text{ cm}^{-1}$  이하로 값이 낮았다. 실수부 유전상수도 PTFE와 결정질 석영, 사파이어가 각각 2.0, 3.9, 9.5로 일정한 값을 가지며, 허수부의 경우 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가진다. 이상의 특성으로 미루어 볼 때, PTFE와 결정질 석영, 사파이어는 D-band 영역에서 사용하는 광학 부품의 소재로 적합하다. 특히 PTFE와 결정질 석영은 광학 부품 중 윈도우(window)로 사용하기에 적합하고, 사파이어는 높은 굴절률을 가지고 있기 때문에 sub-THz 광학소자 및 통신 부품용으로 효과적으로 활용될 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 sub-THz TDS 시스템을 개발하여 D-band (110-170 GHz) 대역에서 다양한 재료의 분광 특성을 측정하고 분석하였다. 특히 시간 영역 분광법의 장점을 활용하여 전기장의 진폭과 위상 정보를 직접 획득함으로써, 별도의 기준 시료 없이 복소 유전율 및 광학상수를 정밀하게 추출할 수 있었다. 이를 통해 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE), 결정질 석영과 사파이어( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 샘플의 굴절률과 흡수계수를 D-band 영역에서 성공적으로 측정하였다. 그 결과 PTFE와 결정질 석영은 낮은 굴절률과 흡수 특성을 보였기에 Sub-THz 윈도우로 사용하기에 적합하고, 사파이어는 소재의 높은 굴절률과 낮은 흡수 특성을 이용할 수 있는 sub-THz 광학소자 및 통신부품에 활용할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 D-band 영역에서도 시간영역 분광법이 다양한 물질의 특성 분석에 효과적일 것으로 사료된다. 또한 본 연구를 통해 VNA 기반 연속파 측정의 한계를 극복하는 sub-THz TDS 시스템의 유용성이 입증되었다. 본 시스템은 측정 속도



**Fig. 5.** Sub-THz optical constants of polytetrafluoroethylene (PTFE), crystalline quartz, and sapphire: (a) Real part of refractive index, (b) imaginary part of refractive index, (c) absorption coefficient, and (d) dielectric constant.

항상, 복잡한 샘플 환경에 대한 적용 용이성, 정밀한 복소 유전율 분석 등에서 기존 방식 대비 우수한 성능을 보였다. 향후 본 연구는 시스템 소형화, 안테나 성능 최적화, 신호 대 잡음 비 개선을 통해 6G 통신, 반도체 공정, 바이오센서 등 다양한 분야로의 확장 가능성이 기대된다.

### 재정지원

본 연구는 한국연구재단(NRF) (Grant no. RS-2024-00408180)의 지원으로 수행되었음.

### 이해상충

저자는 본 논문과 관련된 어떠한 이해충돌 사항도 없었음을 밝힌다.

### 데이터 가용성

본 연구의 결과 분석 및 생성된 데이터는 모두 본 논문 내 명시되어 있으며 공공의 이용이 가능하다. 데이터에 접근하거나 사용하고자 하는 이는 저자에게 타당한 이유를 밝히고 허가를 득해 사용 가능하다.

### References

1. B. Ferguson and X.-C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology," Nat. Mater. **1**, 26-33 (2002).
2. A. Leitenstorfer, A. S. Moskalenko, T. Kampfrath, J. Kono, E. Castro-Camus, K. Peng, N. Qureshi, D. Turchinovich, K. Tanaka, A. G. Markelz, M. Havenith, C. Hough, H. J. Joyce, W. J. Padilla, B. Zhou, K. Y. Kim, X. C. Zhang, P. U. Jepsen, S. Dhillon, M. Vitiello, E. Linfield, A. G. Davies, M. C. Hoffmann, R. Lewis, M. Tonouchi, P. Klarskov, T. S. Seifert, Y. A. Gerasimenko, D. Mihailovic, R. Huber, J. L. Boland, O. Mitrofanov, P. Dean, B. N. Ellison, P. G. Huggard, S. P. Rea, C. Walker, D. T. Leisawitz, J. R. Gao, C. Li, Q. Chen, G. Valušis,

- V. P. Wallace, E. Pickwell-MacPherson, X. Shang, J. Hesler, N. Ridler, C. C. Renaud, I. Kallfass, T. Nagatsuma, J. A. Zeitler, D. Arnone, M. B. Johnston, and J. Cunningham, "The 2023 terahertz science and technology roadmap," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56**, 223001 (2023).
3. M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics* **1**, 97-105 (2007).
4. J. Lin, S. Xu, Q. Wang, J. Zhang, J. Ge, S. Wang, Z. Ou, Y. Ma, W. Zhou, and J. Yu, "D-band 4.6 km  $2 \times 2$  MIMO photonic-assisted terahertz wireless communication utilizing iterative pruning deep neural network-based nonlinear equalization," *Photonics* **11**, 1009 (2024).
5. B. Zhang, Q. Zhang, J. Tan, X. Yang, P. Tian, Y. Han, W. Li, M. Wang, Y. Wei, W. Zhou, K. Wang, and J. Yu, "Demonstration of D-band  $1 \times 2$  SIMO millimeter-wave wireless delivery over 1.2 km employing MRC technology," *Opt. Commun.* **566**, 130720 (2024).
6. T. Maiwald, T. Li, G. R. Hotopan, K. Kolb, K. Disch, J. Potschka, A. Haag, M. Dietz, B. Debaillie, T. Zwick, K. Aufinger, D. Ferling, R. Weigel, and A. Visweswaran, "A review of integrated systems and components for 6G wireless communication in the D-band," *Proc. IEEE* **111**, 220-256 (2023).
7. X. Wang, L. Kong, F. Kong, F. Qiu, M. Xia, S. Arnon, and G. Chen, "Millimeter wave communication: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **20**, 1616-1653 (2018).
8. X. Liu and J. Yu, "Characterization of the dielectric properties of water and methanol in the D-band using a quasi-optical spectroscopy," *Sci. Rep.* **9**, 18562 (2019).
9. S. A. Hosseini Farahabadi, M. Entezami, H. Abouali, H. Amarloo, M. Poudineh, and S. Safavi-Naeini, "Sub-terahertz silicon-based on-chip absorption spectroscopy using thin-film model for biological applications," *Sci. Rep.* **12**, 17747 (2022).
10. J. Romstadt, L. Dierkes, S. Hauptmeier, T. T. Braun, H. Papurcu, J. Richter, P. Stadler, A. Zaben, K. Aufinger, J. Barowski, and N. Pohl, "Proving the feasibility of D-band single SiGe MMIC vector network analyzer extension modules with large system dynamic range," *IEEE J. Microw.* **4**, 706-720 (2024).
11. D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and C. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B* **7**, 2006-2015 (1990).
12. J. Neu and C. A. Schmuttenmaer, "Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)," *J. Appl. Phys.* **124**, 231101 (2018).
13. P. Y. Han, M. Tani, M. Usami, S. Kono, R. Kersting, and X.-C. Zhang, "A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy," *J. Appl. Phys.* **89**, 2357-2359 (2001).
14. J. Lloyd-Hughes and T. I. Jeon, "A review of the terahertz conductivity of bulk and nano-materials," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **33**, 871-925 (2012).
15. M. Koch, D. M. Mittleman, J. Ornik, and E. Castro-Camus, "Terahertz time-domain spectroscopy," *Nat. Rev. Methods Primers* **3**, 48 (2023).
16. T. K. Nguyen, W. T. Kim, B. J. Kang, H. S. Bark, K. Kim, J. Lee, I. Park, T. I. Jeon, and F. Rotermund, "Photoconductive dipole antennas for efficient terahertz receiver," *Opt. Commun.* **383**, 50-56 (2017).
17. I. Malhotra, K. R. Jha, and G. Singh, "Terahertz antenna technology for imaging applications: A technical review," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* **10**, 271-290 (2018).
18. N. M. Burford and M. O. El-Shenawee, "Review of terahertz photoconductive antenna technology," *Opt. Eng.* **56**, 010901 (2017).
19. P. U. Jepsen, R. H. Jacobsen, and S. R. Keiding, "Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas," *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 2424-2436 (1996).
20. BATOP Optoelectronics, "PCA-Photoconductive antenna for terahertz waves," (BATOP Optoelectronics), <https://www.batop.de/products/terahertz/photoconductive-antenna/photoconductive-terahertz-antenna.html> (Accessed date: Aug. 7, 2025).
21. L. DuVillaret, F. Garet, and J. L. Coutaz, "A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2**, 739-745 (1996).
22. V. E. Rogalin, I. A. Kaplunov, and G. I. Kropotov, "Optical materials for the THz range," *Opt. Spectrosc.* **125**, 1053-1064 (2018).
23. Y.-S. Jin, G.-J. Kim, and S.-G. Jeon, "Terahertz dielectric properties of polymers," *J. Korean Phys. Soc.* **49**, 513-517 (2006).
24. M. Naftaly and R. E. Miles, "Terahertz time-domain spectroscopy: A new tool for the study of glasses in the far infrared," *J. Non-cryst. Solids* **351**, 3341-3346 (2005).
25. N. S. Beermann, A. Gebauer, S. Fabretti, W. Zhang, T. Hiraoka, A. W. Achtstein, H. A. Hafez, and D. Turchinovich, "Terahertz time-domain spectroscopy for simultaneous measurement of optical constants, and material thickness with deep-subwavelength precision," *Opt. Express* **33**, 8650-8660 (2025).