

테라헤르츠파 기술 연구 동향 (I) - 고속 고분해 시간영역 분광기술

Research Trends in THz Wave (I) - High-Speed and High-Resolution Terahertz Time-Domain Spectroscopy

이대수, 김기복(한국표준과학연구원 안전측정센터)
 E-mail: kimkibok@kriss.re.kr

테라헤르츠파는 밀리미터파와 원적외선 사이의 주파수 범위가 0.1~10 THz인 전자기파이다. 전파와 광파의 중간적인 성질을 가지고 있는 테라헤르츠파는 X선과는 달리 인체에 거의 무해하며 비금속과 무편광된 물질에서 투과하고 금속에서는 반사하는 특성을 가지고 있다. 테라헤르츠파의 에너지는 분자들의 비틀림, 회전, 진동 에너지와 공명을 잘 일으키기 때문에 물질 고유의 독특한 흡수 스펙트럼을 확인할 수 있다. 이러한 특성으로 인하여 각종 화학물질 등에 대한 모니터링과 정량분석 등이 가능하다[1-3]. 또한 테라헤르츠파가 수분에 강하게 흡수되는 성질을 이용하여 수분함량의 차이가 큰 암세포와 정상세포 판별과 같은 의료영상 분야[4,5], 군사 및 보안관련 연구에 적용하기 위한 연구도 수행되고 있다[6,7]. 테라헤르츠파를 이용한 측정 및 분석기술은 크게 분광분야와 영상분야로 나눌 수 있으며 비파괴 평가분야에도 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다[8-10].

테라헤르츠파 시간영역 분광(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 기술은 전기장의 진폭과 위상을 동시에 측정할 수 있으므로 광대역에서 대상재료의 흡수율과 굴절률을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다[11]. 기존의 테라헤르츠파 시간영역 분광 기술은 1대의 펨토초 펄스레이저를 이용하여 빔 분할기로 2개의 펨토초 광펄스로 나누어 각각을 테라헤르츠파 발생과 검출에 사용한다. 시간지연은 선형모터 스테이지 또는 고속 스캔

방식이 사용된다. 전자의 경우 수백 피코초의 시간지연 폭이 가능하지만 측정에 최소 수분이 걸린다. 반면 후자의 경우 수초 정도의 빠른 측정이 가능하지만 시간지연 폭이 수십 피코초로 제한된다. 시간지연과 주파수 분해능은 반비례 관계이므로, 기존의 분광 기술로는 빠른 측정과 고분해능을 함께 구현하는 것이 어렵고, 테라헤르츠파 분광 기술의 실용화에 저해요인이다. 또한 시간지연을 주는 방식이 광학적인 길이를 변화시키는 것이기 때문에, 측정 결과에는 빔 정렬에 따른 오차가 포함된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 실험 장치에서 선형모터 스테이지를 제거하는 비동기식 광샘플링(asynchronous optical sampling, ASOPS) 방식이 제안되었다[12,13]. 비동기식 광샘플링 방법은 반복주파수가 서로 다른 2대의 펨토초 펄스레이저를 사용한다. 두 펨토초 펄스레이저들의 반복주파수 차이(차주파수)를 정확히 제어하여 두 펄스레이저의 펄스들 사이의 시간지연이 자동적으로 빠르게 변한다. 이 방법을 이용하면 일반적인 테라헤르츠파 시간영역 분광 기술에 비하여 반복주파수의 역수에 해당하는 긴 시간지연 폭을 고속으로 스캔할 수 있으므로, 반복주파수와 같은 주파수 분해능을 갖는 고속 및 고분해 분광이 가능하다[14-17]. 비동기식 광샘플링 방식보다 측정시간을 더욱 줄이기 위해서 최근 본 연구팀에 의해 개발된 전자제어 광샘플링(electronically controlled optical sampling, ECOPS) 방식의 테라헤르츠파 시간영역 분광 기술을 소개하고자 한다.

1. ECOPS 원리

그림 1은 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간 영역 분광 기술의 원리를 나타낸다. 2대의 펨토초 펄스레이저의 반복주파수를 동기하고, 1대의 펨토초 펄스레이저의 반복주파수를 변조함으로써 시간지연을 스캔한다[18]. 전자제어 광샘플링 방식은 시간지연 폭과 스캔주파수를 전자적으로 조절할 수 있으므로, 시간지연 폭을 줄임으로써 스캔주파수를 높이고 측정시간을 줄일 수 있다. 즉, 반복주파수의 역수에 해당하는 매우 긴 시간지연 폭 전체를 스캔하지 않고 수십 피코초의 시간지연 폭을 높은 스캔주파수로 스캔할 수 있다.

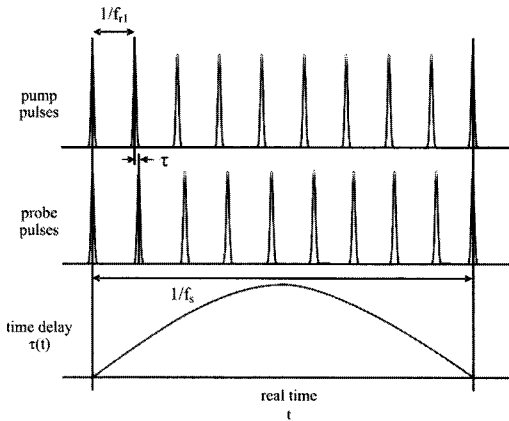


Fig. 1 Principle of ECOPS THz-TDS

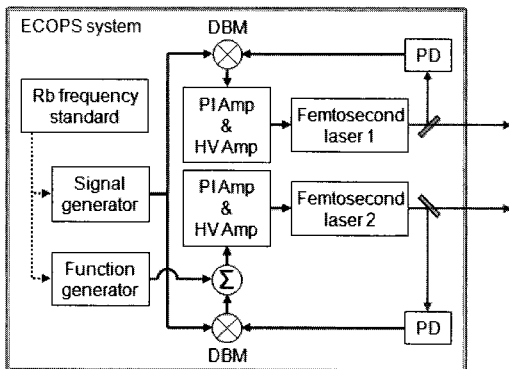


Fig. 2 Schematic diagram of the laser system for ECOPS

2. 분광장치구성

전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템의 개략도는 그림 2와 같다. 레이저 시스템은 2대의 펨

토초 펄스레이저와 1대의 펌프레이저로 구성된다. 532 nm 연속파 펌프레이저 빔을 2개로 나누어 각각 4 W의 출력으로 2대의 펨토초 펄스레이저를 펌프한다. 펨토초 펄스레이저는 100 MHz 반복주파수와 800 nm 중심파장을 갖는다. 펨토초 펄스레이저 1과 2의 펄스폭은 각각 10 fs과 20 fs이다. 출력 안정도와 반복주파수의 안정화를 위해서, 펌프레이저와 펨토초 펄스레이저들이 모두 한 상자에 들어있고 수냉식으로 밀판의 온도가 일정하게 제어된다. 2개의 반복주파수 안정화 장치를 사용하여 2대의 펨토초 펄스레이저의 반복주파수를 100 MHz로 동기한다. 반복주파수 안정화 장치는 광검출기, 기준발전기, DBM(double-balanced mixer), PI(proportional-integral) 증폭기, 고전압 증폭기, 공진기 거울에 부착된 압전 작동기로 구성된다.

펨토초 펄스레이저 출력을 고속 광검출기로 검출하여 1 GHz에 있는 10번째 고조파를 DBM을 이용하여 기준발전기의 1 GHz 신호와 비교한다. 위상검출기로 작용하는 DBM의 출력은 위상 오차를 의미한다. 이 위상 오차를 PI 증폭기와 고전압 증폭기로 증폭하여 압전 작동기에 공급하고 공진기 거울의 위치를 제어하여 반복주파수를 안정화한다. 기준발전기로서 신호발생기를 사용하고, 신호발생기의 1 GHz 신호를 2대의 펄스레이저의 반복주파수 안정화를 위한 공통의 기준신호로 사용하여 2대의 펄스레이저의 반복주파수를 100 MHz로 동기한다. 이때, 펄스레이저 2의 반복주파수 안정화 장치에 외부 오프셋(external offset) 신호를 가하면 펄스레이저 2의 반복주파수 위상이 변한다. 따라서, 그림 3과 같이 함수발생기를 사용하여 변조되는 외부 오프셋 신호를 가하면, 2대의 펄스레이저의 반복주파수의 상대적인 위상이 변조될 수 있다. 상대적인 위상이 변조되므로, 시간지연이 아래 식과 같이 변조된다.

$$\tau(t) = \frac{\Delta\phi(t)}{2\pi f_r} \tag{1}$$

여기서, $\tau(t)$ 는 시간지연, $\Delta\phi(t)$ 는 상대적인 위상, f_r 는 반복주파수이다. Rb 주파수 표준기의 10 MHz 기준신호를 사용하여 신호발생기와 함수발생기를 동기시킨다.

그림 4는 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간 영역 분광 장치를 나타낸다. 전자제어 광샘플링

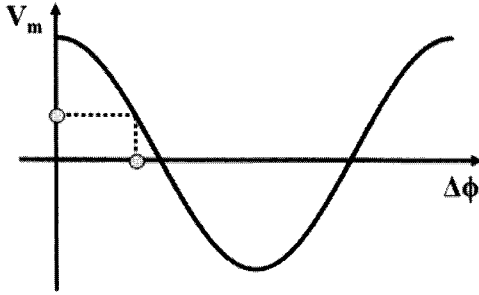


Fig. 3 Phase difference between the repetition frequencies of the two femto-second lasers according to external offset voltage

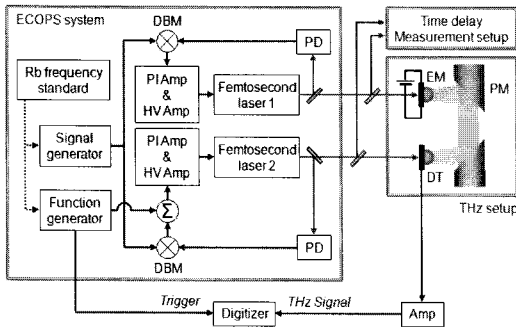


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for ECOPS THz-TDS

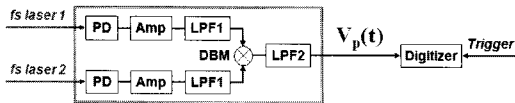


Fig. 5 Schematic diagram of the time delay measurement setup

을 위한 레이저 시스템에서 나오는 펄스레이저 1 과 2의 펨토초 광펄스들이 각각 테라헤르츠 펄스 파 발생 및 검출에 사용된다. 테라헤르츠 펄스파의 발생과 검출을 위해 광전도 안테나를 사용한다. 펄스레이저 1의 60 mW 펨토초 광펄스를 초점거리 50 mm인 렌즈를 사용하여 발생기에 집속하고 발생기에 60 V의 전압을 인가한다. 발생기에서 발생된 테라헤르츠 펄스파는 2개의 비축 포물경(off-axis parabolic mirror)를 지나 검출기로 집속된다. 테라헤르츠 펄스파를 검출하기 위해, 펄스레이저 2의 30 mW 펨토초 광펄스를 초점거리 50 mm인 렌즈를 사용하여 검출기에 집속한다. 검출기에서 펨토초 광펄스에 의해 여기된 전자와 입사하는 테라헤르츠 펄스파의 전기장에 의해 광

전류가 발생된다. 즉, 펨토초 광펄스가 테라헤르츠 펄스파를 광샘플링하여 테라헤르츠 펄스파의 전기장의 세기가 광전류로 측정된다. 검출된 광전류를 가변이득 전류증폭기에 의해 증폭시키고 디지털라이저(digitizer)에 입력한다. 외부 오프셋 신호를 제공하는 함수발생기의 동기 신호에 의해 트리거되는 디지털라이저가 테라헤르츠 펄스파의 시간지연 데이터를 획득하고, 반복해서 획득하는 데이터를 평균하여 신호대 잡음비를 향상시킨다. 또한, 전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템의 시간지연의 시간에 따른 변화를 실제로 측정하기 위해 시간지연 측정 장치를 구성하였다.

그림 5는 시간지연 측정 장치의 개략도를 보여준다. 전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템에서 나오는 펄스레이저 1과 2의 펨토초 광펄스들을 고속 광검출기로 검출한 100 MHz 반복주파수 신호를 100 MHz 증폭기로 증폭한 후에 100 MHz LPF(low-pass filter) 1을 사용하여 고조파들을 제거한다. 위상검출기로 작용하는 100 MHz DBM과 1.9 MHz LPF 2를 사용하여 펄스레이저 1과 2의 100 MHz 반복주파수의 위상차 신호를 추출하고, 함수발생기의 동기신호로 트리거되는 디지털라이저가 이 위상차 신호를 획득한다.

위상차 신호는 아래의 식에서처럼 위상차, 즉 시간지연에 의해 표현되고, 따라서 위상차 신호로부터 시간지연의 시간에 따른 변화를 알아낼 수 있다.

$$V_p(t) = A \cos(\Delta\phi(t)) = A \cos(2\pi f_r \tau(t)) \tag{2}$$

$$\tau(t) = \frac{1}{2\pi f_r} \cos^{-1} \left(\frac{V_p(t)}{A} \right) \tag{3}$$

여기에서, $V_p(t)$ 는 위상차 신호이고 A 는 측정 조건에 의존하는 계수이다. 그림 6은 전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템에서 시간지연이 1 kHz로 스캔될 때 시간지연 측정 장치에 의해 측정된 위상차 신호와 식(3)을 이용하여 얻어진 시간지연의 시간에 따른 변화를 보여준다.

펄스레이저들의 반복주파수가 100 MHz로 동기된 상태에서 시간지연이 스캔된다 하더라도 실제로 2대의 펄스레이저의 펨토초 광펄스들 사이에 시간지터(timing jitter)가 존재한다. 이 시간지터를

측정하기 위해 그림 7과 같이 cross-correlation 측정 장치를 구성하였다. 2대의 펄스레이저의 레이저빔이 비선형 광결정(BBO, 두께 2 mm)의 같은 위치에 집속되어 발생하는 400 nm 파장의 합주 파수 신호를 12.5 MHz의 밴드폭을 갖는 광검출기로 검출한다. 검출된 신호를 함수발생기의

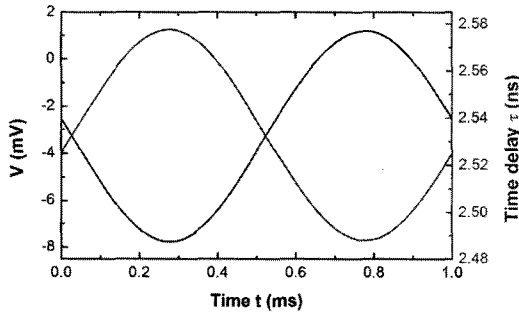


Fig. 6 Phase difference signal (blue curve) measured using the time delay measurement setup and time-varying time delay (red curve) determined from the phase difference signal, when the time delay is scanned at 1 kHz

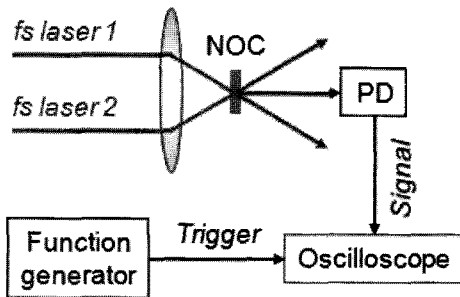


Fig. 7 Schematic diagram of the cross-correlation measurement setup

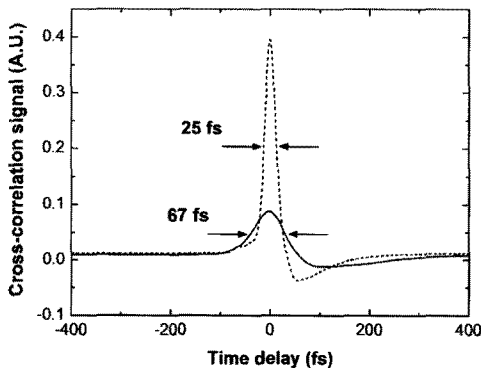


Fig. 8 Cross-correlation measurement results when the time delay is scanned at 1 kHz. The dashed curve is a single scan trace and the solid curve is an average over 1,000 scans

sync 신호에 의해 트리거되는 오실로스코프로 측정한다.

그림 7에서와 같이 전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템에서 시간지연이 1 kHz로 스캔될 때 측정된 cross-correlation 신호를 그림 8에 나타내었다. 점선은 한번 스캔한 cross-correlation 신호로서, 2대의 펄스레이저의 펄스폭이 10 fs과 20 fs이므로 반치폭이 25 fs이 되었다. 실선은 1,000번 스캔한 cross-correlation 신호를 평균한 것으로서, 반치폭이 67 fs으로 넓어졌다. 이것은 2대의 펄스레이저의 상대적인 시간지터로 인한 것이고, 시간지터로 인한 시간지연 분해능(time delay resolution)이 67 fs이라고 할 수 있다.

3. 측정 결과

전자제어 광샘플링을 위한 레이저 시스템에서 시간지연을 1 kHz로 스캔하면서 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형을 측정하였다. 디지털이저로 획득한 데이터는 테라헤르츠 펄스파 전기장의 실시간(t)에 대한 변화, 즉 $E_{THz}(t)$ 이다. 그러나, 그림 7에서 보듯이 시간지연(τ)이 실시간과 함께 선형적으로 변하지 않으므로, $E_{THz}(t)$ 는 정확한 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형이 아니다. 실시간을 그림 7의 측정된 시간지연으로 대체함으로써 정확한 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형, 즉 $E_{THz}(t)$ 를 얻을 수 있다. 그림 9는 이렇게 측정된 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형을 보여준다. 시간지연을 1 kHz로 스캔하면서 1초 동안 1,000번 측정된 데이터를 평균하여 얻은 결과이고, 최대 시간지연 폭은 77 ps이었다. 전자제어 광샘플링에 의해 테라헤르츠 펄스파가 정확히 측정되었는지 확인하기 위해서, 비동기식 광샘플링에 의해 테라헤르츠 펄스파를 측정하였다. 비동기식 광샘플링의 스캔주파수를 20 Hz로 하고 50초 동안 1,000번 측정된 데이터를 평균하여 얻은 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형을 10에 나타냈다. 스캔주파수 외의 모든 측정 조건들은 동일하였다. 전자제어 광샘플링과 비동기식 광샘플링에 의해 측정된 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

$E_{THz}(t)$ 를 FFT(fast Fourier transform)하여 테라헤르츠 스펙트럼을 얻어야 하지만, 시간지연이 실

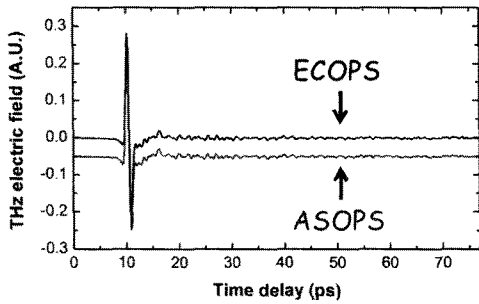


Fig. 9 THz time-domain waveforms measured by ECOPS (black curve) and ASOPS (red curve)

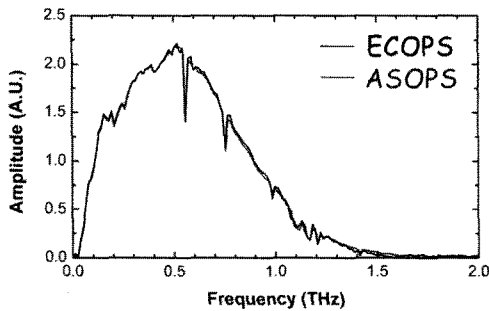


Fig. 10 THz amplitude spectra measured by ECOPS (black curve) and ASOPS (red curve)

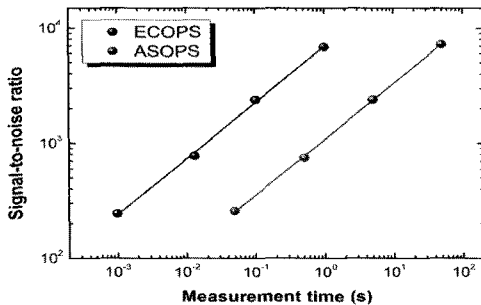


Fig. 11 Signal-to-noise ratio versus measurement time for ECOPS THz-TDS and ASOPS THz-TDS

시간과 함께 선형적으로 변하지 않아서 시간지연 간격이 일정하지 않으므로 $E_{THz}(t)$ 를 FFT할 수 없다. 따라서, 시간지연 간격이 등간격이 되도록 $E_{THz}(t)$ 에 대하여 내삽법(interpolation)을 적용하여 $E_{THz}(t)$ 를 얻는다. 이제, $E_{THz}(t)$ 를 FFT하여 테라헤르츠 스펙트럼을 얻을 수 있다. 그림 9의 전자제어 광샘플링으로 측정된 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형으로부터 이런 식으로 얻어진 테라헤르츠 진폭 스펙트럼은 그림 10과 같다. 또한, 그림 9의 비동기식 광샘플링으로 측정된 테라헤르

츠 펄스파의 시간영역 파형을 FFT하여 얻은 테라헤르츠 진폭 스펙트럼을 함께 보여준다. 두 진폭 스펙트럼이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 9와 10은 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광과 마찬가지로 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광(ASOPS)이 테라헤르츠 펄스파를 정확히 측정할 수 있음을 보여준다.

전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광과 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광의 측정 시간을 비교하기 위해 측정 시간에 따른 신호대 잡음비를 분석하였다. 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광에서는 스펙트럼 대역이 감소하지 않으면서 주어진 측정 시간에 신호대 잡음비가 가장 큰 20 Hz의 스캔주파수를 사용하였고, 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광에서는 스캔주파수를 1 kHz로 설정하였다. 스캔주파수 외의 모든 측정 조건들은 동일하고, 그림 9와 10의 측정 조건과 같다. 신호대 잡음비는 잡음의 시간영역 데이터의 표준편차에 대한 테라헤르츠 펄스파의 시간영역 파형의 peak-to-peak 값의 비로 계산하였다. 그림 11은 측정 시간에 대한 신호대 잡음비를 나타내는 것으로 측정 시간이 증가하면 평균하는 데이터 횟수가 증가하므로 잡음이 줄어서 신호대 잡음비가 증가한다. 직선은 측정값들을 $Y=aX^{\beta}$ 에 맞춘 결과이고 β 가 0.49이므로 산탄 잡음 한계(shot noise limit)에 있음을 알 수 있다. 스캔주파수에 따라서 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광에 비해 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광의 측정 시간이 1/50로 감소하였다.

상용 테라헤르츠 시간영역 분광기, 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광, 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광의 성능을 비교하여 정리하면 표 1과 같다. 일반적인 테라헤르츠 시간영역 분광은 수십 ps의 시간지연 폭, 그 역수인 수십 GHz의 주파수 분해능, 약 20 Hz의 스캔주파수를 갖는다. 비동기식 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광의 스캔주파수는 20 Hz로 일반적인 테라헤르츠 시간영역 분광의 스캔주파수와 비슷하지만 시간지연 폭이 10 ns으로 매우 길어서 100 MHz의 고분해능이 가능하다. 또한, 전자제어 광샘플링 테라헤르츠 시간영역 분광의 시간지연 폭과 주파수 분해능은 일반적인

Table 1 Performance comparison of conventional, ASOPS, and ECOPS THz-TDS.

Method	Conventional THz-TDS	ASOPS THz-TDS	ECOPS THz-TDS
Time delay window	Tens of ps	10 ns	77 ps
Frequency resolution	Tens of GHz	100 MHz	13 GHz
Scan rate	~20 Hz	20 Hz	1 kHz
Measurement time	0.05초 (single scan) 50초 (average over 1,000 scans)	0.05초 (single scan) 50초 (average over 1,000 scans)	0.001초 (single scan) 1초 (average over 1,000 scans)

테라헤르츠 시간영역 분광과 비슷하지만 스캔주파수가 1 kHz로 매우 높아서 측정 시간이 1/50로 감소한다.

참고문헌

- [1] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue, "Nondestructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Opt. Express*, Vol. 11, No. 20, pp. 2549-2554 (2003)
- [2] B. Fisher, M. Hoffmann, H. Helm, G. Modjesch and P. Uhd. Jepsen, "Chemical recognition in terahertz time-domain spectroscopy and imaging," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. S246-S253 (2005)
- [3] H. Hoshino, Y. Sasaki, A. Hayashi, C. Otani and K. Kawase, "Noninvasive mail inspection system with terahertz radiation," *Applied Spectroscopy*, Vol. 63, pp.81-86 (2009)
- [4] S. Nakajima, H. Hoshina, M. Yamashita, C. Otani and N. Miyoshi, "Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 4, pp. 041102 (2007)
- [5] B. Ferguson, S. Wang, D. Gray, D. Abbott and X. C. Zhang, "Identification of biological tissue using chirped probe THz imaging," *Microelectronics Journal*, Vol. 33, pp. 1043-1051 (2002)
- [6] F. Huang, J. Federici, D. Gary, R. Barat and D. Zimdars, "Detection of the agents inside or behind a barrier material," *Proc. SPIE* 5584-4 (2004)
- [7] J. F. Federici, B. Schulkim, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira and D. Zimdars, "T Hz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons, and drugs," *Semicond. Sci. Technol.* Vol. 20, pp. S266-S280 (2005)
- [8] A. Markelz, S. Whitmire, J. Hillebrecht and R. Birge, "T Hz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 47, pp. 3797-3805 (2002)
- [9] K. Kawase, Y. Ogawa and Y. Watanabe, "Non-destructive terahertz imaging of illicit durgs using spectral fingerprints," *Optics Express*, Vol. 11, No. 20, pp. 2549-2554.
- [10] R. F. Anastasi and E. I. Madaras, "Terahertz NDE for under paint corrosion detection and evaluation," The 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, pp. 49-56 (2006)
- [11] B. Ferguson and X.-C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology," *Nat. Mater.*, Vol. 1, pp. 26-33 (2002)
- [12] P. A. Elzinga, R. J. Kneisler, F. E. Lytle, Y. Jiang, G. B. King and N. M. Laurendeau, "Pump/probe method for fast analysis of visible spectral signatures utilizing asynchronous optical sampling," *Appl. Opt.*, Vol. 26, No. 19, pp. 4303-4309 (1987)