

# 주파수 빔 푸리에 변환 테라헤르츠 분광기

## Frequency-Comb Fourier-Transform Terahertz Spectrometer

이대수, 김영찬, 안재욱\*  
 한국표준과학연구원 안전측정센터, \*한국과학기술원 물리학과  
 dsyee@kriss.re.kr

푸리에 변환 분광은 특히 적외선 영역에서 물질의 특성 측정을 위해 널리 사용된다. 일반적인 푸리에 변환 분광에서 하나의 광원과 한 팔에 시간지연을 변화시킬 수 있는 간섭계를 사용하여 간섭신호(interferogram)를 측정한다. 또한, 주파수 빔을 사용하는 푸리에 변환 분광이 적외선 영역에서 시현되었는데, 안정화되지 않은 서로 다른 반복주파수를 갖는 2개의 적외선 펄스 광원을 사용하여 시간지연이 자동으로 스캔되었다<sup>(1,2)</sup>. 이 논문에서 우리는 안정화된 서로 다른 반복주파수를 갖는 테라헤르츠 주파수 빔들을 사용하는 고분해 푸리에 변환 테라헤르츠 분광을 시현한다.

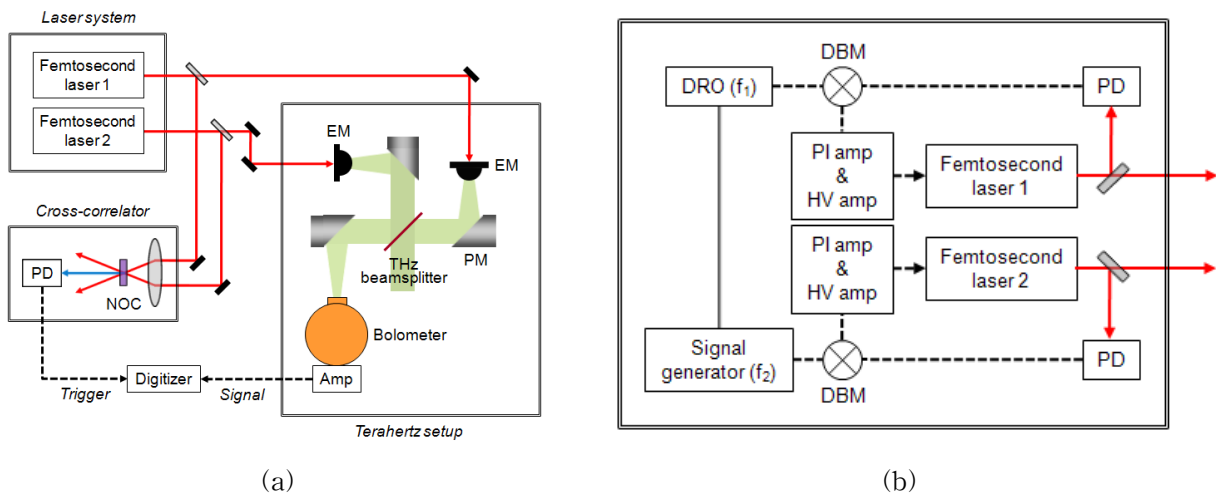


그림 1. (a) 주파수 빔 푸리에 변환 테라헤르츠 분광기의 개략도. (b) 반복주파수 안정화 펄초 레이저 시스템.

우리는 테라헤르츠 주파수 빔을 사용하여 고분해 푸리에 변환 테라헤르츠 분광 장치를 개발하였다. 그림 1은 실험 장치의 개략도이다. 우리는 2개의 펄초 레이저와 반복주파수를 안정화하는 2개의 위상동기루프를 사용한다. 반복주파수의 10번째 조화파를 기준 신호에 동기시켜서 반복주파수를 안정화한다. Cross-correlation 방법을 사용하여 2개의 펄초 레이저 광펄스들의 상대적인 시간지연이 280 fs 이하임을 확인하였다. 2개의 반복주파수 안정화 광펄스들과 2개의 광전도 안테나를 사용하여 100 MHz와 100 MHz - 100 Hz의 반복주파수를 갖는 2개의 테라헤르츠 주파수 빔을 발생시킨다. 2개의 테라헤르츠 주파수 빔이 금속 코팅된 nitrocellulose 필름인 테라헤르츠 빔스플리터에 의해 결합된다. 결합된 테라헤르츠 주파수 빔은 저온 볼로미터로 검출되고 1 MHz 밴드폭

의 증폭기로 신호가 증폭된다. 볼로미터 앞에 장착된 low-pass filter는 3 THz 이상의 전자기파를 막는다. 테라헤르츠 주파수 빔들 사이의 시간지연은 100 Hz의 차주파수로 스캔되고, 펄스 사이의 시간간격에 해당하는 10 ns의 시간지연 폭이 얻어진다. 다지타이저가 cross-correlator에 의해 발생하는 합주파수 신호에 의해 트리거될 때, 간섭신호(시간영역 데이터)를 획득한다. 간섭신호의 노이즈를 줄이기 위해 반복되는 간섭신호들을 평균화한다.

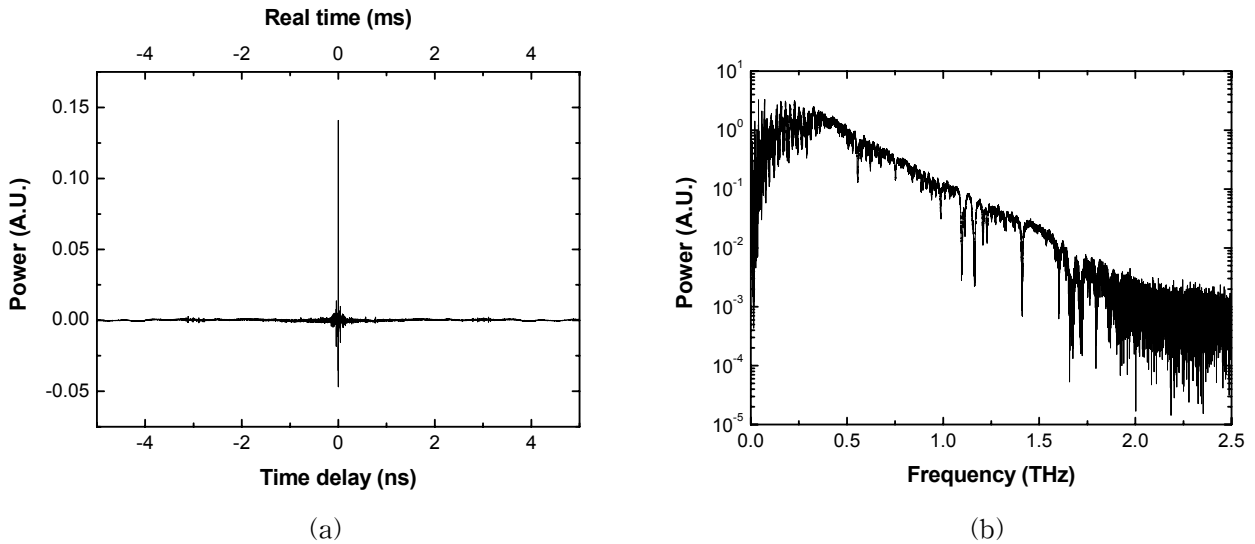


그림 2. (a) 주파수 빔 푸리에 변환 테라헤르츠 분광기로 측정되는 간섭신호. (b) (a)의 간섭신호의 푸리에 변환으로 얻어지는 테라헤르츠 스펙트럼.

그림 2(a)는 주파수 빔 푸리에 변환 테라헤르츠 분광기로 측정되는 간섭신호를 보여준다. 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 200초 동안 10,000개의 간섭신호가 평균화되었다. 차주파수 100 Hz의 역수에 해당하는 10 ms의 실시간 폭에서 간섭신호가 측정되었다. 실시간은 변환요소( $\Delta f/f = 10^{-6}$ )에 의해 시간지연으로 변환될 수 있고, 10 ns의 시간지연 폭이 얻어진다. 간섭신호는 시간지연 0을 중심으로 거의 대칭모양을 갖는다. 간섭신호의 푸리에 변환에 의해 그림 2(b)의 테라헤르츠 스펙트럼이 얻어진다. 스펙트럼은 10 ns의 역수인 100 MHz의 주파수 분해능과 2 THz에 가까운 밴드폭을 갖는다. 35 %의 습도에서 측정되었으므로 스펙트럼에 수증기 흡수선들이 보인다. 신호대 잡음비는 측정시간 즉 평균화된 간섭신호들의 개수에 따라 증가하고, 신호대 잡음비의 측정시간 의존성은 shot noise limit에 가깝다.

결론적으로, 주파수 빔 푸리에 변환 테라헤르츠 분광기를 개발하였다. 시간지연 도구를 사용하지 않고, 서로 다른 안정화된 반복주파수를 갖는 2개의 테라헤르츠 주파수 빔을 사용하여 10 ns의 시간지연 폭을 갖는 간섭신호를 측정함으로써 100 MHz의 주파수 분해능을 갖는 고분해 테라헤르츠 분광을 실현하였다. 또한, 본 분광기는 고속 측정을 통해 비반복적인 현상의 시간분해 분광에 사용될 가능성이 있다.

### 참고문헌

1. F. Keilmann, C. Gohle, and R. Holzwarth, "Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer," Opt. Lett. 29, 1542-1544 (2004).
2. A. Schliesser, M. Brehm, F. Keilmann, and D. W. van der Weide, "Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing," Opt. Express 13, 9029-9038(2005).