

빛펄스의 편광상태 측정: FROG와 분광간섭계측법의 접목

Measurement of the Polarization State of the Ultrashort Pulses: Frequency-Resolved Optical Gating and Spectral Interferometry Combination

양병관, 김진승†

전북대학교 광전자정보기술연구소

† jin@chonbuk.ac.kr

지속시간이 펨토초 수준에 이르는 극초단 빛펄스(ultrashort laser pulse)는 각종 초정밀계측, 미세구조 제작, 각종 재료의 정밀가공, 플라스마 발생, 비선형 광학 등에 널리 응용되며, 앞으로 그 쓰임새가 더욱 확대될 것이다. 그러나 극초단 빛펄스를 활용하려면 먼저 빛펄스를 만들고, 그 특성을 정확하게 재야한다. 극초단 빛펄스의 스칼라 특성인 진폭과 위상을 모두 재는 기법은 지난 십여 년 동안 개발되었다. 극초단 빛펄스는 보통 수십에서 수백 펨토초의 짧은 동안만 지속되나, 이 동안에도 편광상태가 시간에 따라 변할 수 있고, 이에 관한 정보도 중요하다.

편광상태를 결정하려면 빛펄스의 두 직교성분의 진폭과 위상정보 외에 두 성분의 위상차도 알아야 한다. 시간영역에서 쉽게 할 수 있는 방식은 펄스 측정 장치 앞에 편광프리즘을 두고, 편광프리즘의 투과축을 조절하여 두 직교성분을 분리하여 측정한 후, 편광프리즘의 투과축을 직교좌표축의 45도에 두고 측정하면, 두 직교성분의 시간의 기준점을 맞출 수 있고 위상차 등을 결정할 수 있으므로 편광상태의 변화를 온전히 결정할 수 있다. 또 다른 방법으로는 특성을 잘 알고 있는 기준펄스가 있는 경우 주파수 영역에서 간섭을 이용하여 빛펄스를 결정할 수 있는데, 이 방법을 쓰면 약한 빛펄스도 잴 수 있다.

본 발표에서는 기준펄스를 프로그 (FROG: Frequency-Resolved Optical Gating)를 써서 재고, 주파수 영역에서의 간섭법인 분광간섭계측법을 써서 반도체 시료에서 반사되어 나오는 빛펄스의 편광상태의 시간변화를 재는 방법에 대해서 설명한다.

분광간섭계측법에서는 측정할 빛펄스와 기준펄스를 나란하게 정렬하여 분광기에 넣어 분광간섭 신호를 얻는다. 그러면 분광간섭신호는 다음과 같다:

$$S_{SI}(w) = S_{ref}(w) + S(w) + 2\sqrt{S_{ref}(w)S(w)} \cos [\Delta\phi(w) + wT]. \quad (1)$$

여기에서 $\Delta\phi(w) = \phi_{ref}(w) - \phi(w)$ 인데 $\phi(w)$ 와 $S(w)$ 는 분광위상과 분광분포이다. 아래첨자가 없는 것은 특성을 잴 빛펄스의 것이고, 첨자가 있는 것은 기준펄스의 것이다. w 는 각주파수를 나타내고, T 는 두 빛펄스의 상대적 시간지연이다. 특성을 잴 빛펄스의 분광분포는 기준펄스를 막고 잰 분광분포이고, 분광위상은 다음과 같이 찾는다: 먼저 $S_{SI}(w)$ 에서 $S_{ref}(w) + S(w)$ 를 뺀 후 Fourier 역변환한다. 그러면 “시간축”을 따라 이동한 두 개의 곡선을 얻는데 각각 $-T$ 와 $+T$ 에 중심을 둔 $F^{-1}\{\sqrt{S_{ref}(w)S(w)} e^{i\Delta\phi(w)}\}$ 과 $F^{-1}\{\sqrt{S_{ref}(w)S(w)} e^{-i\Delta\phi(w)}\}$ 이다. 이 가운데 주파수가 음수인 성분

을 걸러내고, $F^{-1}\{\sqrt{S_{ref}(w)}S(w) e^{-i\Delta\phi(w)}\}$ 를 dc로 이동시킨 다음 Fourier 변환하면, 주파수 영역에서의 빛펄스를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$E(w) = \sqrt{S_{ref}(w)S(w)} e^{i[\phi(w) - \phi_{ref}(w)]} / E_{ref}^*(w). \quad (2)$$

여기에서 $E(w)$ 과 $E_{ref}(w)$ 는 각각 주파수 공간에서의 빛펄스와 기준펄스이다. *는 복소공액을 나타낸다. 시간영역에서의 빛펄스는 Fourier 역변환하여 얻는다. 빛펄스의 직교성분은 분광기 앞에 편광프리즘을 두고, 프리즘의 투과축을 조절하여 잰다. 기준펄스의 의해서 빛펄스의 두 직교성분의 상관관계가 결정되므로 빛펄스의 편광상태의 시간변화를 온전하게 결정할 수 있다.

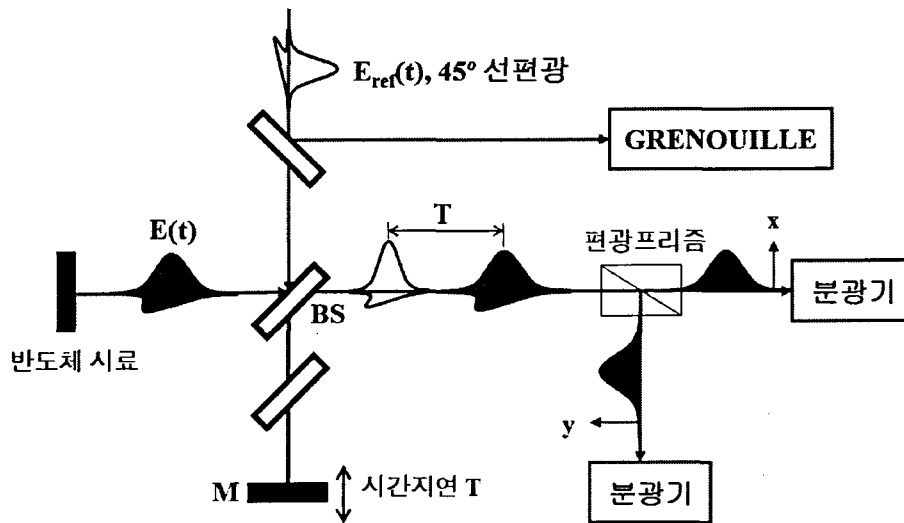


그림 1. 빛펄스의 편광상태의 시간변화를 잰 실험 장치도.

그림 1은 실험장치의 개략도이다. 기준펄스는 펄스하나(single-shot) 방식의 프로그 장치 (GRENOUILLE)를 써서 잰다. Michelson 간섭계의 한쪽 팔에 반도체 시료를 두었고, 반사되어 나오는 빛펄스와 기준펄스를 나란하게 정렬하여 분광기에 넣는다. 분광기 앞의 편광프리즘의 투과축을 0도, 90도에 맞춰 각각의 분광간섭신호로부터 빛펄스의 x - 및 y -편광성분을 재면 빛펄스의 편광상태의 변화를 온전하게 구할 수 있다.

T
E