

상대론적 비선형 톰슨산란의 시간-주파수 분석

Time-Frequency Analysis of Relativistic Nonlinear Thomson Scattering

김정훈, 이종민

광주과학기술원 고등광기술연구소

jhk@gist.ac.kr

페타와트급의 고강도 레이저의 개발로 인해 빛과 물질사이의 상대론적 비선형 상호작용에 관한 연구가 최근에 주목을 끌고 있다. 상대론적 비선형 톰슨산란은 전자에 의한 고강도 레이저의 산란 현상으로 고강도 레이저를 사용하여 연구할 수 있는 대표적인 상대론적 비선형 현상이다. 고강도 레이저가 비선형 톰슨산란을 하게 되면 레이저 주파수의 정수배의 주파수를 갖는 조화파가 발생하는데⁽¹⁾ 레이저의 세기가 매우 클 경우 X-선 영역에 이르는 고차의 조화파의 발생이 가능함이 알려져 있다. 상대론적 비선형 톰슨산란에 의해 발생하는 빛은 레이저 조건에 따라 아토초 영역의 짧은 펄스폭을 가질 수도 있음이 보고되었으며⁽²⁾, 짧은 펄스 형태의 레이저에 의한 비선형 톰슨산란의 스펙트럼 특성이 이론적으로 자세하게 분석되어있다⁽³⁾. 본 연구에서는 Wigner 함수를 사용하여 상대론적 비선형 톰슨산란에 의해 발생하는 빛의 시간-주파수 특성을 분석하였으며, 시간적으로 변하는 주파수를 갖는 레이저 펄스를 사용하여 톰슨산란 스펙트럼을 제어하는 방법을 제시하였다.

Wigner 함수 등을 사용한 시간-주파수 분석법은 빛의 주파수의 시간적 변화를 알려줌으로써 시간적으로 적분된 정보만을 제공하는 스펙트럼에 비해 빛에 대한 보다 자세한 정보를 얻을 수 있게 한다. 시간-주파수 분석에 있어서 널리 사용되는 Wigner 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$W(t, w) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E^*(t - t') E(t + t') e^{-2iwt'} dt'$$

상대론적 비선형 톰슨산란에 의해 발생한 빛의 스펙트럼의 전형적인 예가 그림 1(a)에 제시되었고, 이 스펙트럼 가운데 3차 조화파만 걸러내어 얻어진 Wigner 시간-주파수 분포는 그림 1(b)에 제시되었다. 그림 1(a)로부터 조화파들이 적색편이되었으며 각각의 조화파의 스펙트럼이 비교적 넓게 퍼져 있는 것을 알 수 있는데, 레이저의 세기가 증가할수록 적색편이와 스펙트럼 선평의 넓어짐이 심해진다. 그림 1(b)에 제시되어있는 조화파의 시간-주파수 분포로부터 알 수 있는 바와 같이 조화파의 주파수가 펄스의 앞부분에서는 시간에 따라 감소하다가 펄스의 중앙부분을 넘어서면서부터는 다시 증가하는데, 이는 조화파의 스펙트럼이 넓어지게 하는 원인이 된다.

조화파의 스펙트럼 선평이 넓어지면 조화파의 세기가 감소하게 되어 이 빛의 실제 응용에 좋지 않은 영향을 줄 수 있으므로 이를 제어할 수 있는 방법의 고안이 필요하다. 조화파의 스펙트럼 선평이 넓어지는 현상은 주파수가 시간에 따라 변하는 레이저 펄스(chirped pulse)를 사용함으로써 효과적으로 억제될 수 있다⁽⁴⁾. 그림 2는 적절하게 선택된 chirped pulse의 사용에 의해 조화파의 스펙트럼폭이 좁아지고, 결과적으로 발생하는 조화파의 세기가 증가되는 결과를 보여주고 있다.

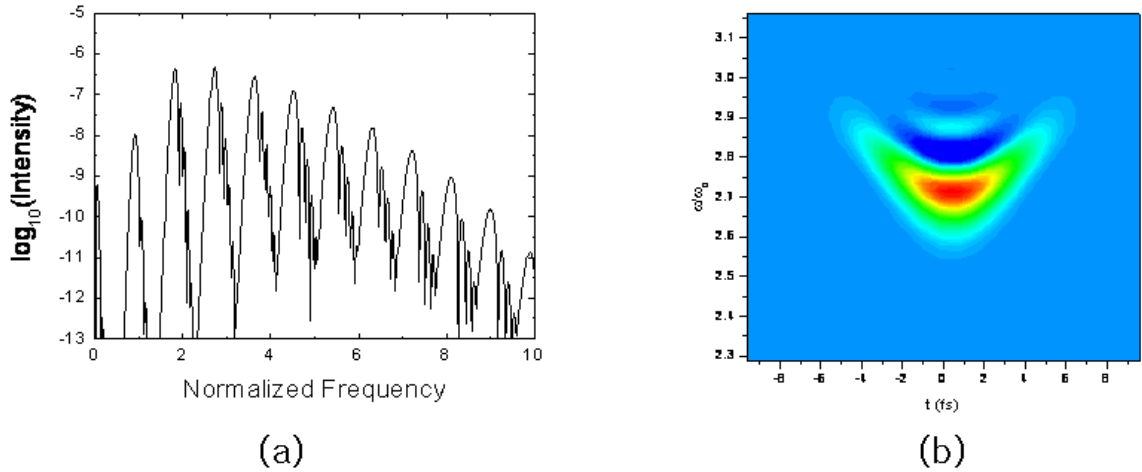


그림 1 (a) 펄스폭 20 fs, 세기 $1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 를 갖는 레이저의 비선형 톰슨산란 스펙트럼. (b) 3차 조화파의 Wigner 시간-주파수 분포.

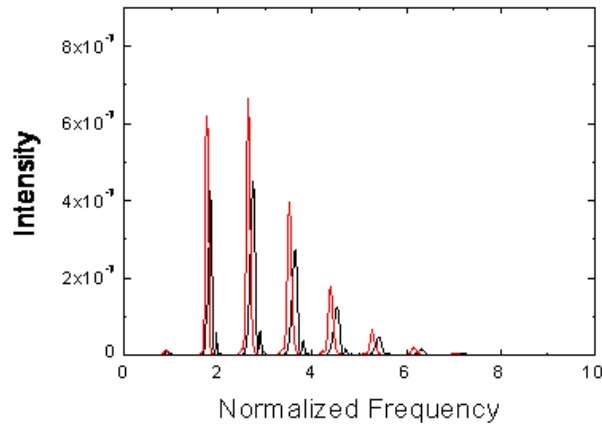


그림 2 Chirped pulse의 사용에 의한 상대론적 톰슨산란의 결맞는 제어. 흑색선은 chirp-free pulse에 대한 결과이고, 적색선은 chirped pulse에 대한 결과임.

참고문헌

1. S. Y. Chen, A. Maksimchuk, and D. Umstadter, "Experimental observation of relativistic nonlinear Thomson scattering", *Nature* 396, 653 (1998).
2. K. Lee, Y. H. Cha, M. S. Shin, B. H. Kim, and D. Kim, "Relativistic nonlinear Thomson scattering as attosecond x-ray source", *Phys. Rev. E* 67, 026502 (2003).
3. G. A. Krafft, "Spectral distributions of Thomson-scattered photons from high-intensity pulsed lasers", *Phys. Rev. Lett.* 92, 204802 (2004).
4. D. G. Lee, J. H. Kim, K. H. Hong, and C. H. Nam, "Coherent control of high-order harmonics with chirped femtosecond laser pulses", *Phys. Rev. Lett.* 87, 243902 (2001).