

수 광주기를 갖는 레이저에 의해 구동된 전자에서 발생하는 단일 zeptosecond 펄스

Single Zeptosecond Pulse Generation from Few-Cycle Laser Driven Electrons

김정훈, 최일우, 유태준, 노영철, 고도경, 이종민
광주과학기술원 고등광기술연구소
jhk@gist.ac.kr

레이저를 이용한 물리 현상의 시분해 연구에 있어서 측정의 시간 분해능은 사용된 레이저의 펄스폭에 의해서 결정된다. 따라서 초고속 물리, 화학적 현상의 시분해 연구를 위해서 매우 짧은 폭을 갖는 빛의 개발이 필수적으로 요구된다. 최근에 보고된 연구 결과에 따르면 매우 강력한 펨토초(10^{-15} sec.) 레이저를 원자에 조사하면 원자로부터 레이저 주파수의 홀수 배에 해당하는 고차조화파가 발생하는데, 이때 발생하는 빛은 수 십 또는 수 백 아토초(10^{-18} sec.)의 시간폭을 갖는다⁽¹⁾. 이 빛을 사용하면 초고속 현상의 아토초 영역에서의 시분해 연구가 가능하다.

본 연구에서는 비선형 튜브 산란을 이용하여 원자에서 발생하는 고차조화파보다 더 짧은 펄스폭을 갖는 빛을 생성시키는 방법을 제시한다. 자유 전자가 고강도의 레이저장 하에 놓이게 되면 비선형 상호작용을 겪게 되어 레이저 주파수의 고차조화파들로 이루어진 매우 넓은 스펙트럼을 갖는 빛이 발생한다⁽²⁾. 이 빛은 강력한 레이저장에 의해 구동된 원자에서 발생하는 고차조화파와 마찬가지로 매우 짧은 펄스들로 구성되어 있다⁽³⁾. 비선형 튜브 산란에 의해 발생하는 펄스의 폭과 세기 및 그 밖의 특성은 전자에 입사하는 레이저의 편광, 절대 위상, 관찰 각도, 전자의 초기 속도 등에 따라 매우 다른 값을 갖는다. 특정한 조건 아래에서 발생된 빛은 많은 펄스들로 구성된 펄스열이 아닌 단일 펄스 형태를 가질 수도 있으며, 이는 이 빛의 응용에 있어서 매우 중요하다. 레이저와 상호작용하는 전자가 초기에 상대론적 속도로 움직이고 있을 경우, 레이저의 입사각과 전자의 운동방향을 적절히 조절하고 여기에서 발생하는 빛을 특정한 각도에서 검출하면 아토초 이하의 시간폭을 갖는 펄스를 얻을 수 있다.

일반적으로 수 광주기만을 갖는 매우 짧은 레이저와 물질간의 상호작용에 있어서 관측되는 물리량은 레이저의 절대 위상에 매우 민감하게 의존하는 양상을 보이는데 비선형 튜브 산란의 경우도 예외는 아니다. 강력한 레이저장 속에 있는 원자에서 발생하는 고차조화파의 경우와 마찬가지로 튜브 산란의 경우에도 수 광주기의 레이저 펄스를 사용할 경우 발생하는 빛의 펄스열의 길이를 줄여 펄스열 안에 단일 펄스만이 포함되도록 할 수 있다. 이 때 레이저의 절대 위상을 적절히 선택하는 것이 매우 중요하다. 그림 1은 서로 다른 절대 위상을 갖는 레이저를 사용해서 얻은 튜브 산란된 빛의 시간 영역에서의 모양을 보여준다. 5 펨토초의 펄스폭을 갖는 레이저에 대해서 적절한 절대 위상 값을 선택할 경우 발생하는 빛은 단일 펄스 형태를 가질 수 있다 [그림 1(b)].

튜브 산란의 패턴은 레이저를 산란시키는 자유 전자의 초기 조건에 따라서도 매우 다양한 양상을 보인다. 초기에 정지된 자유 전자에 대해서는 레이저의 세기를 대략 2×10^{20} W/cm² 정도 이상으로 증가시켜야 발생하는 빛의 펄스폭이 1 아토초 이하가 될 수 있으나, 자유 전자가 초기에 이미 상대론적인 운동을 하고 있을 경우에는 이보다 훨씬 낮은 세기의 레이저를 사용하여도 zeptosecond, 10^{-21}

sec.) 영역의 펄스폭을 갖는 빛을 발생시킬 수 있다. 그림 2는 초기에 $v = 10$ 를 갖는 전자에 의한 톰슨 산란의 시간 특성을 보여준다. 전자의 초기 운동 방향은 레이저의 진행방향과 수직이다. 전자의 초기 운동 방향과 같은 방향인 $\theta = 90^\circ$ 에서 관찰한 경우와 $\theta = 68^\circ$ 에서 관찰한 경우 매우 다른 톰슨 산란 패턴을 얻게 된다. $\theta = 68^\circ$ 에서 얻을 수 있는 빛의 펄스폭은 대략 170 켈토초이다 [그림 2(b)].

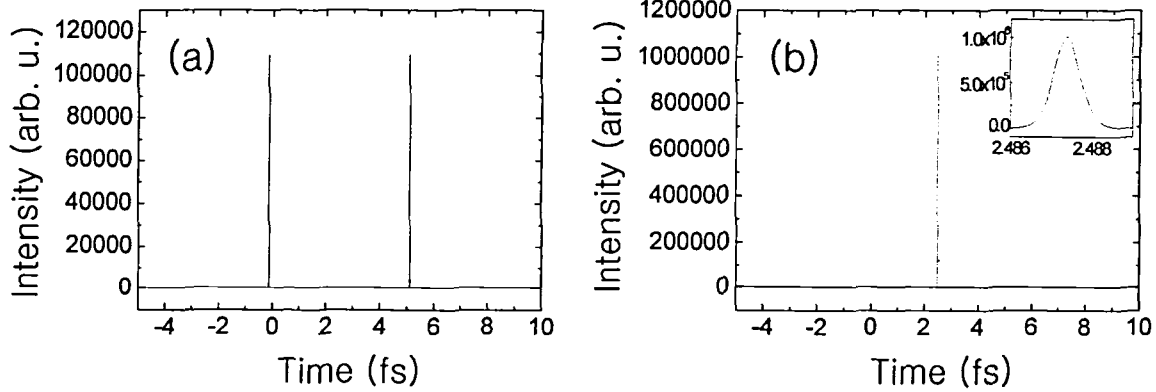


그림 1. 원편광된 5 fs 레이저 펄스의 정지된 전자에 의한 톰슨 산란 펄스 모양과 절대 위상 의존성. 레이저의 세기는 $2 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$, 절대 위상은 (a) $-\pi/2$ 와 (b) $\pi/2$ 이다. 관측 각도는 $\theta = 16^\circ$, $\phi = 0$ 이다.

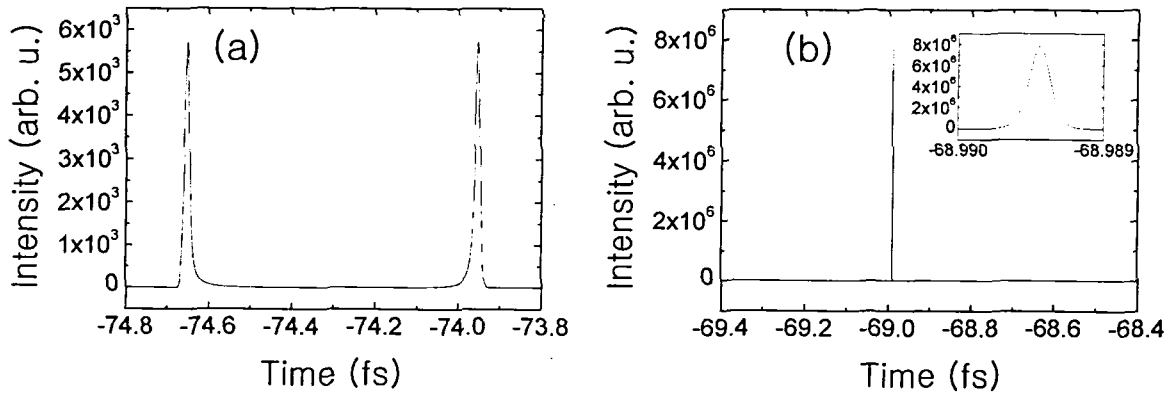


그림 2. 원편광된 5 fs 레이저 펄스의 상대론적 전자에 의한 톰슨 산란 펄스 모양. 레이저의 세기는 $1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$, 절대 위상은 $\pi/2$ 이다. 전자의 초기 조건은 $v = 10$ 이고 레이저의 진행 방향과 수직하게 움직인다. 관측 각도는 $\phi = 0$ 이고 (a) $\theta = 90^\circ$, (b) $\theta = 68^\circ$ 이다.

[참고 문헌]

1. M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, "Attosecond metrology", Nature 414, 509 (2001).
2. S. Y. Chen, A. Maksimchuk, and D. Umstadter, "Experimental observation of relativistic nonlinear Thomson scattering", Nature 396, 653 (1998).
3. 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).

T
P