수 광주기 영역에서의 상대론적 비선형 톰슨산란

Relativistic Nonlinear Thomson Scattering in the Few-Cycle Regime

김정훈, 이종민

광주과학기술원 고등광기술연구소

jhk@gist.ac.kr

고출력 레이저 기술의 비약적 발전으로 비교적 작은 규모의 실험실에서도 고강도 레이저장과 물질의 상호작용에 관한 실험연구를 수행할 수 있게 되었다. 레이저의 세기가 10^{14} W/cm^{2}에서 10^{17} W/cm^{2}에 이르는 영역에서 빛과 물질의 상호작용 실험이 가능해졌고 이를 통해 이전의 낮은 레이저 세기 영역에서 관측되지 않았던 새로운 현상들이 발견되었다. 예를 들면 문턱초과이온화 (above-threshold ionization), 터널링이온화, 장벽너머이온화 (over-the-barrier ionization) 등과 같은 비섭동론적 이온화 현상과, 원자의 안정화, 비순차적 이중이온화, 고차조화파 발생 등과 같은 현상들이 발견되었다. 이 가운데 실제 응용에 있어서 고차조화파 발생이 특히 주목받고 있는데, 이는 이 과정에서 발생하는 빛이 좋은 결맞음성을 갖고 스펙트럼이 매우 넓어 X선 영역의 짧은 파장의 빛을 포함하는 점[(1)], 그리고 이 빛이 수십 또는 수백 아토초의 짧은 펄스폭을 가지는 특성[(2)] 때문이다. 레이저의 세기가 더욱 증가하면 전자가 레이저 펄스의 앞단에서 조기에 원자로부터 떨어져 나와 전자와 원자사이의 재충돌이 불가능해지므로 고차조화파 발생이 억제되며, 자유전자에 의한 레이저의 톰슨산란이 중요해지기 시작한다.

상대론적 비선형 톰슨산란에 의해 발생된 빛은 저차의 조화파에서 X선 영역에 이르는 넓은 스펙트럼을 가지고 있으나[(3)] 스펙트럼의 전체적인 모습은 원자로부터 발생하는 고차조화파와는 사뭇 다르다. 펄스폭이 수 광주기 정도로 짧은 고강도 레이저의 상대론적 톰슨산란 스펙트럼이 그림 1(a)에 제시되었다. 5 fs의 펄스폭과 I = 2X10^{20} W/cm^{2}의 세기를 갖는 선편광된 레이저가 계산에 사용되었고, 레이저장의 영향 아래에 있는 전자에서 발생하는 톰슨산란된 빛을 레이저의 진행 방향과 수직한 방향에서 관측할 때의 계산결과가 제시되었다. 그림 1(b)는 이 빛의 시간 특성을 보여준다. 그림으로부터 이 빛이 강력한 레이저장에 의해 구동된 원자에서 발생하는 고차조화파와 마찬가지로 매우 짧은 펄스들로 구성되어 있음을 알 수 있다[(4)]. 상대론적 비선형 톰슨산란으로부터 발생하는 빛의 특성은 레이저의 편광, 세기, 절

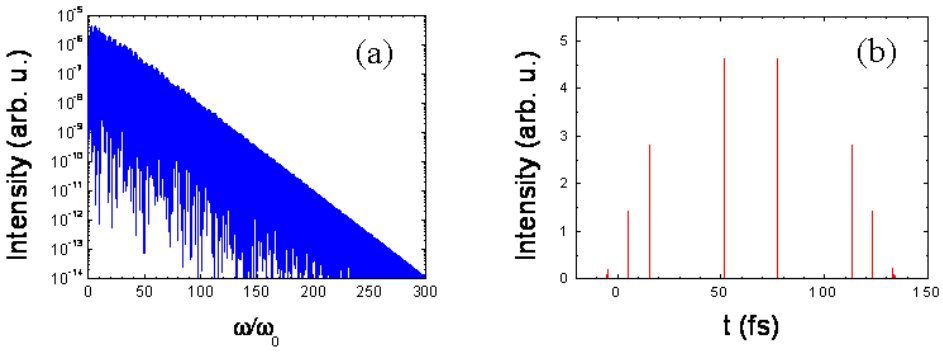

그림 1. 5 fs의 펄스폭과 I = 2X10^{20} W/cm^{2}의 세기를 갖는 선평광된 레이저의 단일 전자에 의한 (a) 톰슨산란 스펙트럼과 (b) 시간축에서의 펄스 모양. 레이저의 진행방향과 수직한 방향에서 관측.

대위상 등에 매우 민감하게 의존하며, 관찰 각도, 전자의 초기 운동 조건 등에 따라서도 다양한 양상을 보인다.

위에 제시한 단일 전자에 대한 결과는 상대론적 톰슨산란의 특성을 파악하는데 도움을 줄 수 있으나 보다 실제적인 상황을 모사하기 위해서는 유한한 공간을 점유한 다수의 전자에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 그림 2에 보이는 바와 같이 상대론적으로 움직이는 직경 2 ㎛의 구형태의 전자 다발에 의한 톰슨 전방산란에 대한 계산을 수행하였다. 주어진 매개변수 조건하에서 상대론적 비선형 톰슨산란된 빛의 에너지가 최대가 되는 각도에서 관측되는 빛의 펄스 모양이 그림 3(a)에 제시되었다. 적절한 필터를 사용하여 이 빛의 낮은 주파수 성분을 제거하면 그림 3(b)에 보이는 바와 같이 수백 아토초의 짧은 펄스를 얻을 수 있다.

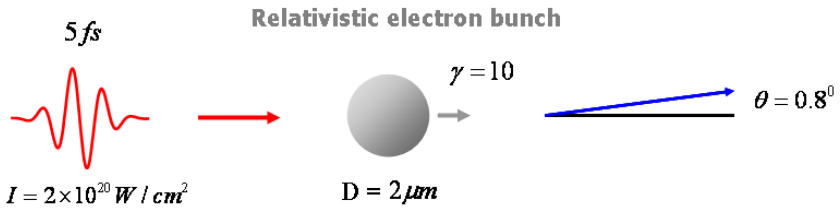

그림 2. 상대론적 비선형 톰슨 전방산란. 5 fs의 펄스폭과 I = 2X 10^{20} W/cm^{2}의 세기를 갖는 원평광된 레이저가 계산에 사용됨.

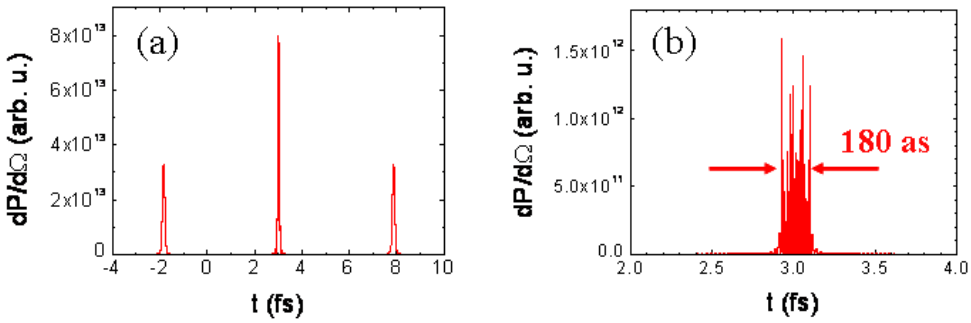

그림 3. (a) 톰슨산란 빛의 시간축에서의 펄스 모양과 (b) 레이저의 주파수의 50차 이하의 주파수를 갖는 빛의 성분을 차단하는 필터를 통과한 후의 펄스 모양.

참고문헌

1. E. Seres, J. Seres, F. Krausz, and Ch. Spielmann, Phys. Rev. Lett. 92, 163002 (2004).
2. 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).
3. S. Y. Chen, A. Maksimchuk, and D. Umstadter, "Experimental observation of relativistic nonlinear Thomson scattering", Nature 396, 653 (1998).
4. 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)