

고차조화파의 구성 요소별 분해

Resolving High-Order Harmonics into Components

김정훈, 신현준, 이동근, 남창희

한국과학기술원 물리학과

jhkim@laputa.kaist.ac.kr

매우 짧고 결맞는 극자외선 광원의 개발에 대한 기대로 강력한 레이저 장과 상호작용하는 원자에서 일어나는 비선형 다광자 현상에 대한 연구가 최근에 활발하게 전개되고 있다. 이 상호작용 과정에서 발생하는 빛은 매우 넓은 파장 영역에 걸쳐있으며, 입사 레이저의 홀수 배에 해당하는 매우 높은 차수의 조화파들을 포함하고 있다고 알려져 있다^(1,2). 최근의 이론 및 실험에 의하면, 강력하고 짧은 레이저 펄스를 사용하면 고차조화파의 파장에 청색변이를 일으킬 수 있다^(3,4,5). 실제 관측된 청색변이는 이웃하는 홀수 조화파의 간격보다 더 크다⁽⁶⁾. 따라서, 원리적으로는 매우 넓은 가변 폭을 갖고 연속적으로 파장을 조정할 수 있는 파장가변 극자외선 광원의 개발이 가능하다.

시간 의존 슈뢰딩거 방정식의 수치 계산으로 얻을 수 있는 고차조화파 스펙트럼은 고차조화파 발생의 전형적 특징인 평탄 영역 (plateau region)과 잘림 영역 (cut-off region)을 잘 보여준다. 그러나, 펄스 폭이 수 십 펨토초로 줄어들면 각각의 고차조화파를 구별할 수 없는 매우 복잡한 스펙트럼을 평탄 영역에서 얻게 된다. 이렇게 복잡한 스펙트럼 구조는 평탄 영역에서의 고차조화파 분석, 특히 청색변이의 측정에 걸림돌이 되어왔다. 한 고차조화파의 발생에 기여하는 여러 개의 전자궤도가 그 고차조화파를 여러 부분으로 나누며, 나누어진 고차조화파 선들은 레이저의 펄스폭이 줄어들어 따라 옆으로 이동하여 근처에 존재하는 다른 차수의 고차조화파와 겹침과 동시에 간섭을 일으키게 되어 복잡한 스펙트럼 구조를 만들어 내는 것이다. 고차조화파의 체계적인 분석, 특히 전자궤도에 따라 다른 고차조화파 구성 성분들의 주파수 영역에서의 위치와 청색변이 양의 측정을 위해서, 고차조화파를 그 구성 요소로 분해해 낼 수 있는 방법의 고안이 요구된다.

본 논문 발표에서는 평탄 영역에서의 복잡한 스펙트럼 구조를 분해할 수 있는 간단한 방법을 제시하고자 한다. 원자로부터 이온화되어 방출된 각각의 전자는 레이저 세기에 대한 고유의 의존성을 가지고 있으며, 서로 다른 여러 레이저 세기에서 구한 쌍극자 스펙트럼들을 위상을 고려하여 합하면 레이저의 세기변화에 덜 민감한 조화파 성분들만 걸맞게 더해져서 살아남고 다른 성분들은 상쇄간섭에 의해 사라질 것이다. 이러한 특성을 이용하여 중요하지 않은 조화파 성분들을 제거할 수 있고, 따라서 고차조화파 성분들이 잘 분리된 깨끗한 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이 방법을 사용하면 슈뢰딩거 방정식의 수치 계산으로부터 간단한 준고전적 모델이 예측한 고차조화파 발생의 여러 흥미로운 결과들을 대부분 도출해 낼 수 있다.

그림 1(a)는 $I=10^{15}$ W/cm²의 세기와 800 nm 파장을 갖는 폭 80 fs의 레이저 펄스에 조사된 네온 원자로부터 방사되는 고차조화파의 스펙트럼을 보여주고 있다. 매우 복잡한 구조 때문에 고차조화파의 위치를 파악하기가 곤란하다. 위에서 제시한 방법을 사용하여 서로 다른 레이저 세기에서 구한 20개의 스펙트럼을 합하여 얻은 고차조화파 스펙트럼이 그림 1(b)와 (c)에 제시되어 있다. 계산에서 사용된 레이저 세기의 변화량은 그림 1 (b)와 (c)에서 각각 $dI/I = 2.6\%$ 와 $dI/I = 8\%$ 이다. 그림으로부터 확실히 알

수 있듯이, 레이저 세기에 민감하게 의존하는 위상을 갖는 성분들이 제거되어 식별 가능한 깨끗한 고차조화파 스펙트럼이 얻어졌다. 그림 1(b)에서는 이온화 후 한 광주기 내에 핵으로 돌아오는 짧은 궤도와 긴 궤도 성분들이 살아 남았고, 그림 1(c)에서는 그들 가운데 레이저 세기의 변화에 가장 덜 민감한 짧은 궤도 성분만 살아 남았다.

본 연구에서 제시된 스펙트럼 분석 방법은 고차조화파의 발생에 기여하는 여러 궤도 성분들을 분리해 낼 수 있으며, 따라서 슈뢰딩거 방정식의 수치 계산 결과와 준고전 이론이 예측하는 궤도별 고차조화파 특성을 직접적으로 비교 분석할 수 있는 기회를 제공한다. 제시된 방법을 통해 얻은 스펙트럼은 잘 분리된 고차조화파 선들을 보여주므로, 고차조화파의 청색변이를 측정하는데 본 방법이 유용하게 사용될 수 있다.

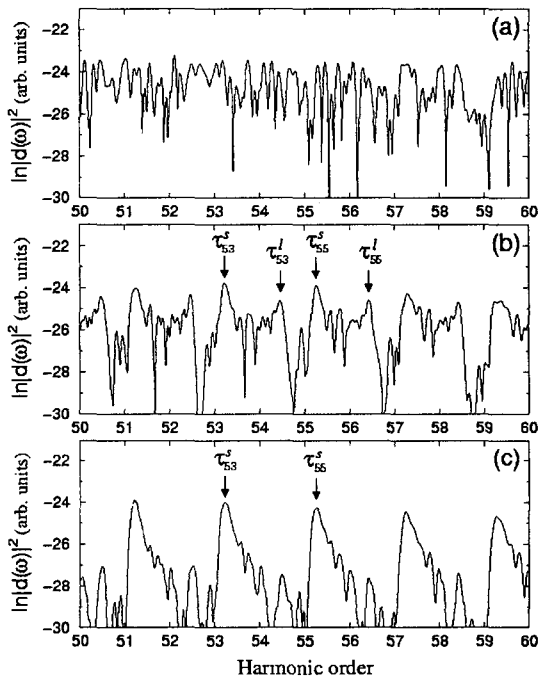


그림 1. 네온에서 발생하는 고차조화파 스펙트럼. (20개 스펙트럼의 합) (a) $dI/I=0\%$. (b) $dI/I=2.6\%$. (c) $dI/I=8\%$.

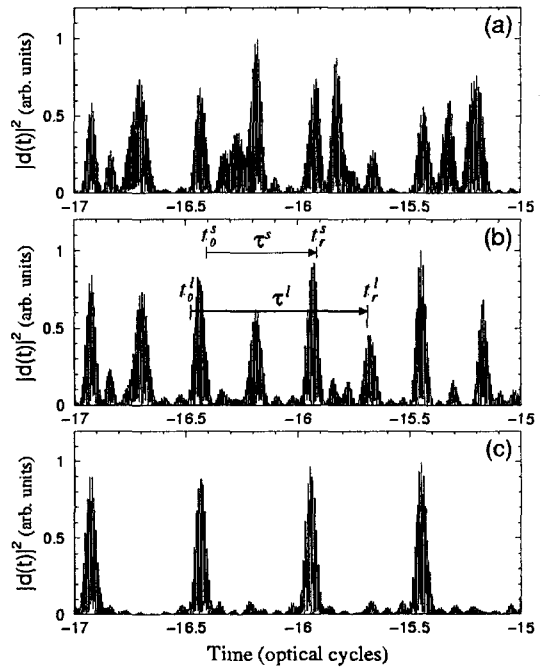


그림 2. 그림 1에 대한 time profile.

감사의 글. 본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행됨.

참고 문헌

1. M. Protopapas, C. H. Keitel, and P. L. Knight, Rep. Prog. Phys. **60**, 39 (1997).
2. P. Salieres, A. L'Huillier, Ph. Antoine, and M. Lewenstein, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **41**, 83 (1999).
3. J. B. Watson, A. Sanpera, and K. Burnett, Phys. Rev. A **51**, 1458 (1995).
4. C. Kan, C. E. Capjack, R. Rankin, and N. H. Burnett, Phys. Rev. A **52**, R4336 (1995).
5. H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. **83**, 2544 (1999).