

위상정합 조건에 따른 고차조화파 발생

High-order harmonics generated in different phase matching conditions

이동근, 신현준, 김정훈, 김형택, 차용호, 남창희
한국과학기술원 물리학과
donggun@kaist.ac.kr

최근에 개발된 강력한 레이저는 원자가 tunneling 이온화 될 수 있는 충분한 세기를 가지고 있다⁽¹⁾. Tunneling 이온화 된 전자는 원자의 Coulomb 퍼텐셜 보다 레이저 장에 의한 영향이 훨씬 크므로 기존의 perturbation 이론으로는 이들간의 상호작용을 설명하기에 부족하였다. 뿐만 아니라 이온화된 전자가 레이저 장의 방향이 바뀔때 따라 재결합함으로써 발생하는 고차조화파는 기존의 perturbation 이론으로 설명될 수 없는 발생효율이 차수에 상관없이 거의 일정한 평탄영역을 가지고 있음이 실험적으로 관측되었다⁽²⁾. 강력한 레이저 장과 원자들과의 상호작용에 의해서 생성된 고차조화파는 기존의 비선형 현상으로 설명되어지는 이차 조화파나 삼차 조화파와 같이 레이저의 간섭성을 그대로 물려 받으므로 극자외선 영역의 간섭광원으로써 이의 활용가치가 높을 것으로 보고 있다. 현재에는 기존의 엑스선 레이저로 가능했던 고밀도 플라즈마 밀도 측정등과 같이 극자외선 간섭광이 필요로 하는 연구등에 활용되고 있다. 뿐만 아니라 고차조화파는 효율이 거의 일정한 넓은 파장 영역인 평탄 영역을 가지므로 이의 넓은 파장 영역을 이용하면 아토초 수준의 짧은 극자외선 광원을 만들 수 있을 것으로 이론적으로 예견되어 지고 있다⁽³⁾.

본 연구에서는 펨토초 레이저에 의해 발생된 고차조화파를 연구하였다. 특히 고차조화파의 평탄영역의 복잡한 분광구조와 위상정합 조건에 따라 고차조화파의 분광구조가 어떻게 변해 가는지에 대해 연구하였다. 이전까지 포화세기 이하와 수백 펨토초 이상의 긴 펄스폭을 갖는 레이저를 이용하여 행해진 실험에서는 단지 레이저 파장의 홀수 차수에 해당하는 조화파만 관측되었으나, 수십 펨토초 영역의 레이저 펄스를 이용할 경우 조화파의 분광구조가 아주 복잡해진다. 본 연구에서는 이들 조화파의 분광구조가 복잡해지는 이유와 아토초 펄스를 형성하기 위해서 필수적인 단일케적에 의한 고차조화파를 어떻게 생성하는지에 관하여 기존 고차조화파 이론과 실험결과를 통하여 설명하고자 한다.

아래 그림 1. 에 펨토초 레이저와 네온 원자와의 상호작용에 의해서 생성된 고차조화파 분광선을 보여주고 있다. 가로축은 조화파의 차수에 해당되고 세로축은 레이저빔의 집속점과 네온 기체표적과의 거리를 나타낸다. 표적이 레이저의 집속점에 놓여 있었을 때 한 차수내에 두 개 이상의 고차조화파 성분이 생성되었고, 표적을 집속점에서 멀어지게 위치했을 때 그들 중에서 단일 성분의 고차조화파가 선택됨을 관측하였다(그림 1. 참조).

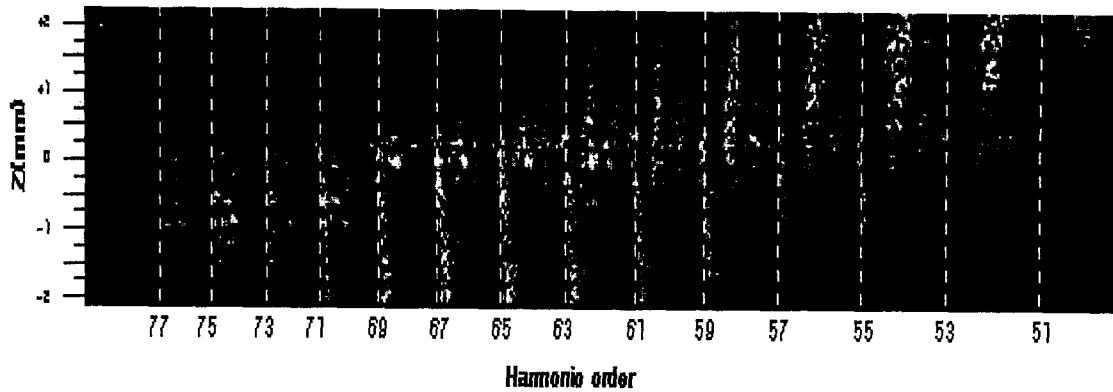


그림 1. 펄스초 레이저와 네온기체의 상호작용에 의해 생성된 고차조화파 분광선. 가로축은 조화파 차수이고 세로축은 레이저 집속점에 대한 표적의 위치이다.

고차조화파의 발생과정을 아주 잘 설명하는 반 고전이론인 3 단계모형에선 특정 차수의 조화파를 발생시키는 전자의 궤적이 평탄영역에서는 2개 이상이 존재함을 예견하고 있다⁽⁴⁾. 이들 여러 궤적에 의한 조화파는 기존의 긴 시간폭과 낮은 세기, 포화세기 이하의 레이저에 의해 발생될 때는 단지 동일한 파장인 홀수 차수에 겹치게 되므로 분리가 불가능하였다. 그러나 본 실험에서 사용된 레이저 조건에서는 이들 여러 전자 궤적에 의해서 발생된 조화파의 각기 다른 청색변이 정도에 의해서 분광학적으로 분리가 가능하였다. 뿐만 아니라 다른 전자 궤적에 의해서 생성된 조화파는 매질 내에서의 위상정합조건이 다르다. 짧은 전자 궤적에 의해서 생성된 조화파는 주로 레이저 집속점을 지나서 기체 매질이 놓여졌을 때 레이저빔의 중심부근에서 collinear phase matching 조건이 존재하며, 이보다 더 긴 전자 궤적에 의해서 생성된 조화파는 레이저 집속점 이전에 매질이 놓여졌을 때 off-axis에서 noncollinear phase matching 조건이 존재하게 된다⁽⁵⁾. 이와 같이 집속점과 표적과의 거리와 방향에 따라서 어떤 특정 전자 궤적에 의한 조화파만을 선별적으로 선택이 가능하고, 그림 1.의 실험적 관측사실을 잘 설명한다.

고차조화파의 평탄영역을 이용하여 아토초 펄스를 생성시키기 위해서는 평탄영역의 각 차수의 조화파가 일정한 위상관계를 가져야만 한다. 그러나 기존 고전이론에서는 여러 전자 궤적에 의한 조화파가 서로 간섭함으로써 일정한 위상관계를 가지지 못함을 보였고, 단일 궤적에 의한 고차조화파를 형성함으로써 아토초 펄스를 생성할 수 있을 것으로 예상되어지고 있다. 그림 1.에서 보여주는 바와 같이 기체 매질을 레이저 집속점 이후에 놓아 짧은 전자 궤적 성분의 고차조화파만 발생되도록 하여 단일 궤적 성분만이 고차조화파 발생에 기여하도록 함으로써 아토초 펄스를 생성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Y. H. Cha, Y. I. Kang, and C. H. Nam, J. Opt. Soc. Am. B **16**, 1220 (1999).
- (2) J. L. Krause, K. J. Schafer, and K. C. Kilander, Phys. Rev. Lett. **70**, 766 (1993).
- (3) P. antoine, A. L'Huillier, and M. Lewenstein, Phys. Rev. Lett. **77**, 1234 (1996).
- (4) C. Kan, C. E. Capjack, and R. Rankin, Phys. Rev. A **52**, R4336 (1995).
- (5) P. Balcou, P. Salieres, A. L'Huillier, and M. Lewenstein, Phys. Rev. A **55**, 3204 (1997).