

이온화 되는 기체를 진행하는 고강도 펨토초 레이저 펄스의 시간적 특성 연구

Temporal characterization of intense femtosecond laser pulses propagating through an ionizing gas

이계황*, 김철민, 남창희
한국과학기술원 물리학과
*momenta@kaist.ac.kr

지난 10여년간 원자의 전기장에 버금가는 세기를 갖는 레이저 펄스를 이용하여 원자의 비섭동적 비선형 현상이 많이 연구되어 왔다.⁽¹⁾ 이러한 현상은, 기존의 섭동적 비선형 과정과는 달리, 처프(chirp)와 같은 레이저 펄스의 시간적 변화에 따라 민감하게 변한다. 따라서 이러한 비선형 과정을 일으키는 레이저 펄스가 매질을 진행하면서 겪게 되는 변화를 알아보는 일은 이들 현상의 분석에 있어 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는, 변화의 가장 주요한 요인인 이온화와 케르 효과(Kerr effect)를 고려한 파동 방정식을 수치적으로 풀어서, 고강도 레이저 펄스가 기체 매질을 진행하면서 겪게 되는 시간적 변화를 알아보고 이 양상을 시간-진동수 분포를⁽²⁾ 통해 분석하였다.

문제를 간단히 하기 위해 1차원 파동 방정식을 고려하였다. 이온화율의 계산은 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 영역에서 실험치에 가장 부합한다고 알려져 있는 PPT (Perelomov-Popov-Terente'v) 모델을 이용하였고⁽³⁾, 케르 효과는 흔히 쓰이는 $n(t) = n_0 + n_2 I(t)$ 의 형태를 사용하였다. 식을 간단히 하기 위해 좌표 변환($\tau = t - z/v_g$)을 수행한 후 푸리에 변환을 하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

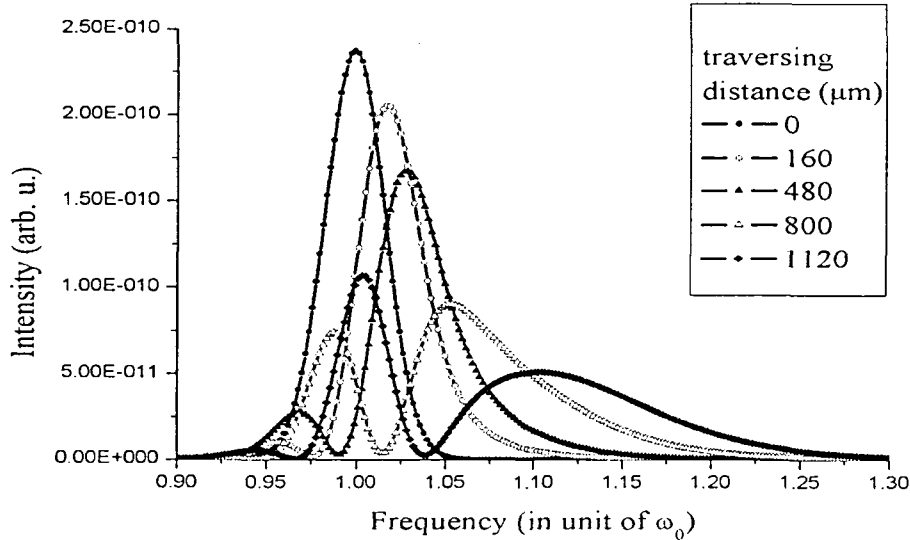
$$[\partial_z^2 - \frac{2}{c} i\omega \partial_z] \tilde{E}(z, \omega) = FT[(\frac{\omega_p^2}{c^2} - 2\frac{\omega^2}{c^2} n_2 I(\tau)) E(z, \tau)]$$

푸리에 변환 안에 있는 시간의 함수들은 공간격자를 하나 진행할 때마다 역푸리에 변환을 통해 구한다. 매질로는 수백 토르(torr)의 네온 기체를 가정하였고, 레이저의 펄스의 최대 세기는 10^{15} W/cm^2 , 펄스 폭은 30 펨토초로 했다. 케르 효과는 이 조건에서 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

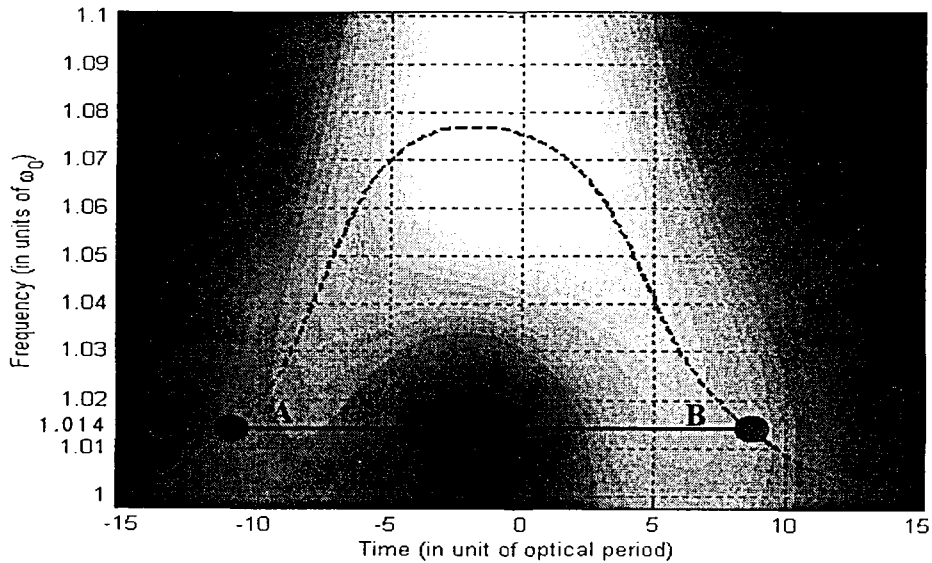
[그림 1]은 진행 거리에 따른 빔터의 변화를 보여준다. 이온화에 의해 플라즈마가 발생하여 굴절률이 시간적으로 감소하게 되면, 빔터는 차츰 높은 진동수쪽으로 이동한다. (진동수 청색이동) 하지만 계속 진행해 나가면 빔터가 두 개의 흑으로 나뉘게 되는데, 이후 흑의 개수는 증가하고 각 흑은 높은 진동수쪽으로 이동한다. 이 특이한 현상을 분석하기 위해 $800 \mu\text{m}$ 를 진행한 경우의 시간-진동수 분포를 계산해 보았다. ([그림 2]) 실선은 주어진 시간에서 가장 세게 나오는 진동수이다. [그림 1]에서 진행 거리가 $800 \mu\text{m}$ 경우 세기가 0에 가까운 진동수는 $1.014\omega_0$ 인데, [그림 2]에서 보면 이 진동수는 A 시점과 B 시점에서 발생한다. 진동수의 실선과 A와 B를 잇는 직선으로 이루어진 부분의 면적은 두 신호의 위상차를 나타내므로, 이 값이 π 가 되어 두 신호가 진동수 공간에서 상쇄 간섭을 하게 되면 이 진동수의 빔터값이 작아진다. 청색이동이 더 진행되어 실선이 위쪽으로 이동하고 이 부분의 면적이 커지면, 보다 높

은 진동수 성분도 상쇄 간섭 조건을 만족할 수 있게 되므로 흑의 숫자가 늘어나게 된다.

위에서 살펴본 바와 같이, 레이저 펄스가 매질을 이온화시키며 진행하면 진동수 청색이동을 겪게 되는데, 그 정도는 펄스의 각 부분마다 다르다. 그 결과 한 진동수 성분이 서로 다른 시점에서 존재하게 되고 진동수 공간에서 간섭을 일으킨다. 이와 같은 진동수 변화의 양상을 파악하는 것은 이에 따라 민감하게 변하는 비섭동적 비선형 현상 (high-order harmonic generation, above threshold ionization 등)의 이해에 큰 도움이 될 것이다.



[그림 1] 진행 거리에 따른 빛띠



[그림 2] 800 μm를 진행했을 때의 시간-진동수 분포

참고문헌

- [1] T. Brabec and F. Krausz, Rev. Mod. Phys. 72, 545 (2000)
- [2] L. Cohen, Time-Frequency Analysis, Prentice Hall PTR (1995)
- [3] S. F. J. Larachelle, A. Talebpour, and S. L. Chin, J. Phys. B 31, 1215 (1998)