

## 고차조화파 주입 엑스선 레이저에 관한 이론적 연구

## Theoretical Study on High-harmonic-seeded X-ray Laser

김철민, Karol A. Janulewicz, 김형택, 이종민  
 광주과학기술원 펨토과학기술연구센터 및 고등광기술연구소  
 chulmin@gist.ac.kr

고출력 레이저를 이용한 고차조화파 발생과 엑스선 레이저는 독특한 성질을 가진 극자외선 광원으로서 많은 관심의 대상이 되고 있다.<sup>(1)</sup> 고차조화파는 고출력 극초단 레이저 펄스에 의해 구동된 원자에서 발생하는데, 우수한 결맞음성, 선형편광, 펨토초 이하의 펄스폭을 갖으나 에너지가 작다 ( $\mu\text{J}$  이하). 엑스선 레이저는 고출력 레이저가 고체에 입사하여 발생하는 고온의 고밀도 플라즈마에서 얻어지는데, 결맞음성이 다소 떨어지고 편광이 정의되어 있지 않으나, 우수한 선폭 ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-5}$ )과 높은 에너지 ( $\mu\text{J}$  이상)를 갖는다. 최근에는 고차조화파 펄스를 엑스선 레이저 매질에 입사시켜서 고차조화파와 엑스선 레이저의 장점을 모두 갖는 극자외선 광원을 개발하려는 연구가 이루어지고 있다.<sup>(2,3)</sup>

본 연구에서는 고차조화파 펄스의 엑스선 매질 진행을 전산시뮬하여 고차조화파 주입 엑스선 레이저의 물리를 이해하고자 하였다. 입사하는 고차조화파가 우수한 결맞음성, 선형편광, 짧은 펄스폭, 낮은 에너지를 가졌다는 점을 고려하면, 매질과 전자기파의 결맞는 상호작용을 정확히 기술해야 함을 짐작할 수 있다. 따라서 펄스의 세기만을 기술하는 복사전송방정식 (radiation transport equation)과 레이저율방정식 (laser rate equation) 대신, 맥스웰-블로흐 방정식<sup>(4)</sup>을 이용하였다. 한편, 회전과 근사와 공명 근사를 이용하여, 여러 물리량의 진폭만을 계산하였다. 아래는 두 근사를 이용하여 간략화된 맥스웰-블로흐 (Maxwell-Bloch) 방정식이다.<sup>(5)</sup>

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ba} &= -\gamma_{ba}\sigma_{ba} + iV_{ba}C(\rho_{bb} - \rho_{aa}) \\ \dot{\rho}_{bb} &= -\gamma_b\rho_{bb} - 2\text{Im}\{V_{ba}^*C\sigma_{ba}\} \\ \dot{\rho}_{aa} &= -\gamma_a\rho_{aa} + 2\text{Im}\{V_{ba}^*C\sigma_{ba}\} + \gamma_{br0}\rho_{bb} \\ \frac{\partial E_C(z, \tau)}{\partial z} &= -i\frac{\mu_0 c \omega_{ba}}{2}P_C(z, \tau)\end{aligned}$$

여기에서  $b$ 와  $a$ 는 각각 위상상태와 아래상태를 의미한다.  $\sigma_{ba}$ ,  $V_{ba}C$ ,  $E_C$ ,  $P_C$ 는 각각  $\rho_{ba}$ , 상호작용 해밀토니안, 전기장, 분극의 복소수 진폭을 나타내며,  $\gamma$ 는 각종 완화 계수,  $\omega_{ba}$ 는 공명 주파수이다.

매질의 상태를 나타내는 여러 가지 수치, 즉, 이온 밀도, 전자 밀도, 선폭, 쌍극자 모멘트는 레이저-플라즈마의 유체 방정식을 푸는 코드인 EHYBRID<sup>(6)</sup>와 원자의 성질을 계산하는 코드인 MCDFGME<sup>(7)</sup> 및 선폭의 실험치<sup>(1)</sup>를 이용하여 얻었다. 구체적으로 820 nm의 59차 조화파 펄스가 니켈같은 은 ( $\text{Ag}^{19+}$ )으로 이루어진 밀도반전된 플라즈마에 입사하는 경우를 고려하였다. 공명전이는  $\text{Ag}^{19+}: 4d (^1S_0) - 4p (^1P_1)$  이고, 공명파장은 13.9 nm 이다.

고차조화파 펄스가 레이저 매질을 진행하면서 겪는 변화가 그림 1에 나타나 있다. 25 fs의 펄스폭, 1 nJ의 에너지를 갖고 펄스 단면적이  $400 \mu\text{m}^2$  인 59차 고차조화파 펄스가  $g_0 = 225 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1/\gamma_{ba} \sim 370 \text{ fs}$  인 매질에 입사하는 경우이다. 입사펄스가 매질의 수명 ( $1/\gamma_{ba}$ )에 비해 매우 짧으므로, 그 자체는 거의 증폭되지 않는다. 하지만 매질의 방사를 촉발시켜서 강한 후행 펄스를 만들어 낸다. 이후의 펄스 진행은 초기의 극초단 조화파 펄스가 아닌 후행 펄스에 의해 결정된다. 후행 펄스의 펄스폭은 매질의 수명에 의해 제한을 받는다. 진행거리가 2500  $\mu\text{m}$  일 때 후행 펄스의 후반부에 변조가 생기는데, 이는 두 준위 간의 라비 (Rabi) 진동에 의한 것이며, 라

비 주기가 매질 수명에 근접할 만큼 후행 펄스가 커졌음을 의미한다.

위의 논의에서는 오직 결맞는 상호작용만이 다루어졌다. 밀도반전된 매질은 늘 자발 방출을 하므로, 입사 펄스와의 결맞는 상호작용 뿐만 아니라 자발 방출의 결 안맞는 상호작용도 매질의 방사를 일으킨다. 따라서 추후에는 자발 방출의 무작위성까지 고려하도록 맥스웰-블로흐 방정식을 수정하여 펄스 진행을 탐구할 예정이다.

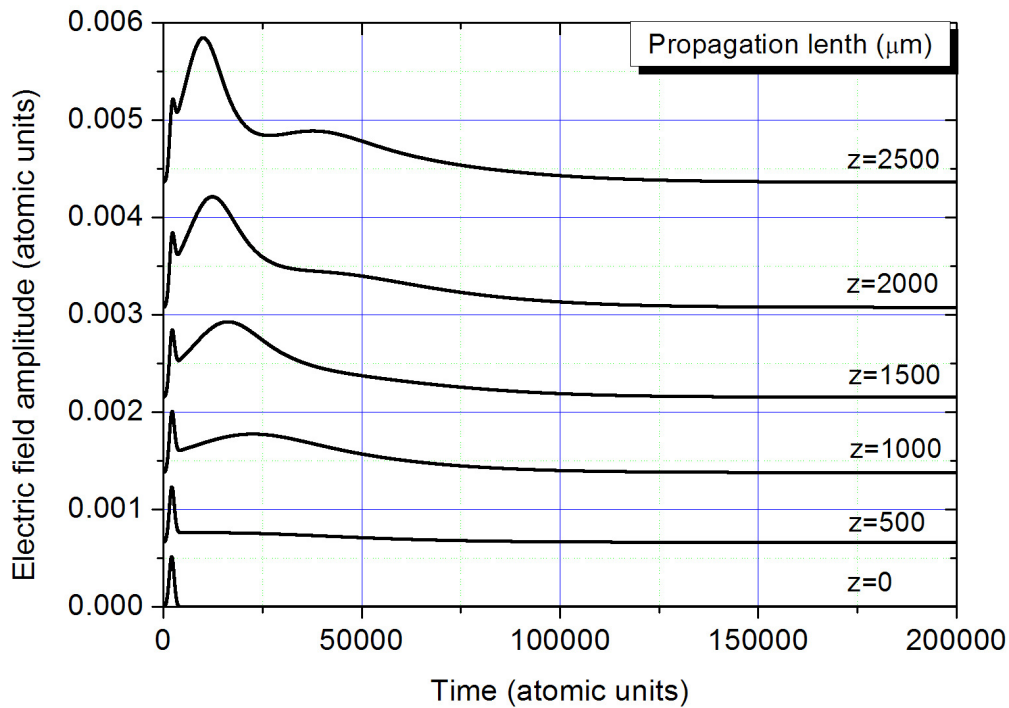


그림 1. 진행 거리에 따른 극자외선 펄스의 변화 (초기 입사 펄스의 펄스폭은 25 fs, 에너지는 1 nJ, 빔단면적은  $400 \mu\text{m}^2$ ).

#### 참고문헌

1. P. Jaegle, *Coherent Sources of XUV Radiation* (Springer, New York, 2006).
2. Ph. Zeitoun et al., *Nature* **431**, 426 (2004).
3. Y. Wang et al., *Nature Photonics* **2**, 94 (2008).
4. L. Allen and J. H. Eberly, *Optical Resonance and Two-level Atoms* (Dover publications, New York, 1987).
5. E. Armandillo and I. J. Spalding, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **8**, 2123 (1975).
6. G. J. Pert, *J. Fluid Mech.* **131**, 401 (1983).
7. MCDFGME (Multiconfiguration Dirac Fock and General Matrix Elements program, release 2005) written by J. P. Desclaux and P. Indelicato (<http://dirac.spectro.jussieu.fr/mcdf>).