

펨토초 펄스레이저의 제2고조파 발생에 대한 수치해석

Numerical Analysis for Second Harmonic Generation of Femtosecond Pulse Laser

김진중, 김병태

청주대학교 광학공학과

btkim@alpha94.chongju.ac.kr

비선형 결정을 이용한 고조파 변환은 단파장의 레이저 광원을 얻을 수 있다는 잇점으로 인해 폭넓게 연구되고 있다. 고조파 변환효율은 결정의 비선형계수에 비례하여 증가하지만 입사하는 광의 강도에 따라서도 커다란 영향을 받는다. 펄스형 레이저의 고조파 변환은 고강도의 광을 사용할 수는 있지만 결정 내의 분산특성에 의해 고조파 변환효율이 제한받는다. 분산특성에 의한 변환효율 감소는 입력펄스의 폭이 짧을수록 그 영향이 커지게 된다.

고조파 발생은 결정 내부에서 두 개의 입사광 성분과 생성되는 고조파 성분의 상호작용으로 해석하게 된다. 제2고조파 발생에 작용되는 각 성분은 결정의 굴절을 차이로 인해 서로 다른 군속도를 갖는다. 이러한 군속도의 차이는 펄스간의 작용영역을 짧게 하고, 변환효율 감소의 원인이 된다. 펄스의 폭이 짧을 경우에는 비선형 결정의 분산특성에 의한 군속도 분산도 고려하여야 한다. 개개의 펄스에 대한 군속도 분산의 효과 역시 제2고조파 생성의 제한요인으로 작용한다. 나노초 이상의 펄스폭을 가지는 경우에는 군속도 불일치에 의해 작용하는 펄스간의 위상차에 비하여 펄스폭이 넓으므로 작용영역을 제한하는 효과는 무시될 정도로 작고, 실제 계산에서도 고려하지 않는다. 피코초의 펄스를 이용한 고조파 변환은 군속도 불일치의 효과를 무시할 수 없으며 변환효율 감소의 중요한 원인으로 작용한다. 그러나 이 경우에도 군속도 분산항은 여전히 무시할 수 있을 정도의 작은 양이 된다. 30fs 이하의 펄스를 이용한 고조파 변환은 군속도 불일치뿐만 아니라 군속도 분산 효과에 의한 영향을 받게 된다.⁽¹⁾ 이러한 두 가지 현상은 결과적으로 제2고조파 변환효율을 감소시키고, 출력되는 펄스모양을 왜곡시키게 된다.

입력 펄스의 강도가 $10\text{GW}/\text{cm}^2$ 이상이 될 경우 비선형 결정으로부터 고조파 변환에 영향을 줄 수 있는 3차 비선형 현상을 유발시킨다.⁽²⁾⁽³⁾ 3차 비선형 현상은 입력광의 세기에 따라 결정의 굴절을 변화로 나타내고 이러한 현상으로는 자기집속 효과와 자기위상변조 효과를 들 수 있다. 자기집속 효과는 KDP와 같은 비선형 결정내에서는 큰 영향을 미치지 못하는 못한다.⁽⁴⁾ 자기위상변조 효과의 경우는 시간차원의 굴절을 변화에 의한 위상변조를 나타낸다. 펄스의 시간적인 강도 변화에 따라 굴절률의 분포가 바뀌고 시간에 따른 굴절률의 변화는 펄스의 위상을 변조시키는 역할을 하게 된다. 고조파 변환의 경우 세 개의 파가 상호작용을 하기 때문에 자기위상 변조(self-phase modulation) 외에 펄스 상호간의 위상에 영향을 주는 상호위상 변조(cross-phase modulation)도 고려하여야 한다. 시간차원의 자기위상 변조와 상호위상 변조는 펄스의 형태를 변화시키고, 고조파 생성의 저해 요인으로 작용한다.

본 논문에서는 30fs의 펄스를 기준으로 하였고, 펨토초 펄스에 의한 고조파 발생에서 고려해야만 하는 군속도 분산과 군속도 불일치, 그리고 고강도 레이저의 경우 발생할 수 있는 3차 비선형 효과에 의한 자기위상 변조와 상호위상 변조를 고려하여 고조파 변환을 수치해석하였다. 사용된 결정은 단축결정인 KDP(KH_2PO_4)와 BBO($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)이고, 입력파의 파장은 table top 고강도 레이저로 많이 개발되고 있는 Ti:Sapphire 레이저의 중심 파장인 790nm를 기준으로 하였다. 각각의 축에 대한 군속도와 군속도 분산의 값은 Sellmeier 계수로부터 구하였고, 그 값은 표 1.과 같다.

펨토초 펄스에 의한 고조파 변환의 경우, 군속도 불일치 효과에 의한 변환효율 저하를 보상하는 방법으로 지연판을 이용하는 방법을 고려하여 보았다. Type I 결정과 type II 결정에서의 군속도 불일

표1. 상광선축과 위상정합축에 대한 군속도, 군속도 분산 (KDP crystal)

	790 nm	395 nm
$k'_e(\theta_m): (1/\nu_e) (\times 10^{-11} s/cm)$	0.4930	0.5090
$k''_e (\times 10^{-28} s^2/cm)$	3.7001	9.8818
$k'_o(\theta_m): (1/\nu_o) (\times 10^{-11} s/cm)$	0.5057	0.5238
$k''_o (\times 10^{-28} s^2/cm)$	2.8791	11.4930

치 효과에 의한 변환효율도 비교, 검토해 보았다. 지연판 사용에 있어서 발생할 수 있는 비선형성은 고려하지 않았다. 수치해석은 유한차분법으로 하였으며, 입력강도는 $50\text{GW}/\text{cm}^2$ 부터 $2\text{TW}/\text{cm}^2$ 까지 변화시켜가며 계산하였다. 그 외에도 입력 펄스폭의 변화에 따른 효율변화도 해석하였다. 그림 1.은 30fs의 펄스폭과 $800\text{GW}/\text{cm}^2$ 의 입력 강도를 가진 광에 의해 생성되어지는 제2고조파 펄스형상의 변화를 보여준다.

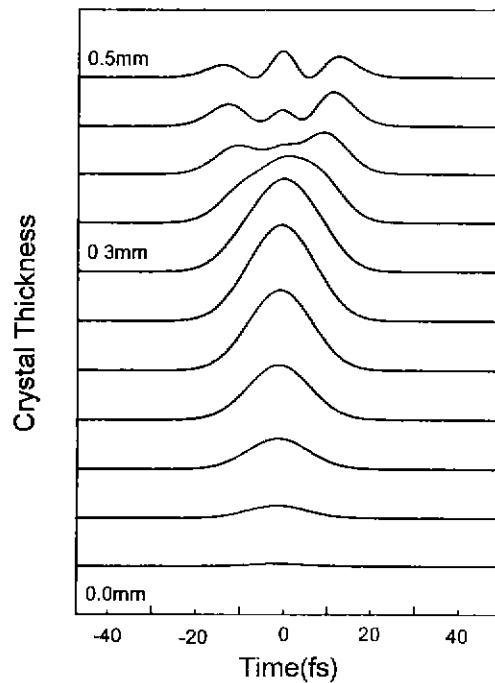


그림 1. 결정 두께에 따른 제2고조파 펄스의 변화

[참고문헌]

1. N. C. Kothari and X. Carloti, J. Opt. Soc. Am. B, 5 (1988) 756.
2. T. Ditmire, A. M. Rubenchik, D. Eimerl, and M. D. Perry, J. Opt. Soc. Am. B, 13 (1996) 649
3. K. Yamakawa, H. Shiraga, Y. Kato and C. P. J. Barty, Opt. Lett. 16 (1991) 1953.
4. T. B. Razumikhina, L. S. Telegin, A. I. Kholodnykh, and A. S. Chirkin, Sov. J. Quantum Electron. 14 (1984) 1358.