

표면 플라즈몬 공명 효과를 이용한 고차조화파 생성

High-order Harmonic Generation using the Surface Plasmon Resonance effect

진중환, 김승철, 박인용, 최준희, 김승우

KAIST 기계공학과

jongghan@kaist.ac.kr

EUV 및 X선은 가시광보다 파장이 짧은 영역으로, 빛을 이용한 정밀 측정에서 파장의 크기에 의해 제한되는 회절한계에 의한 측정 분해능을 향상시킬 수 있으며, X선 영역까지 확장을 함으로써 좋은 투과 특성을 이용하여 생명 공학과 관련된 미세 측정이나 비파괴 검사에 활용할 수 있다. 특히 이와 동시에 가간섭성이 좋은 광원을 생성할 수 있다면 빛의 간섭 및 회절 현상을 이용한 다양한 응용이 가능하다.

EUV 및 X선을 생성하는 여러 방법 중의 하나가 가속기를 이용하는 방법이다. 가속기를 통한 EUV 및 X선 생성의 경우 큰 광량 및 좋은 질의 빛을 얻을 수 있으며, 동시에 다양한 여러 파장대역을 얻을 수 있는 장점은 있으나, 시설 자체의 크기가 아주 방대하고 고가의 시설이므로 실험실 단계에서 간단히 구성할 수 없다. 이를 극복하는 방법으로 최근에는 펄토초 레이저를 이용한 고차 조화파 생성 방법이 제안되어 비교적 작은 크기의 실험 장치로써 가간섭성 EUV 및 연X선을 생성할 수 있게 되었다⁽¹⁾.

고차 조화파 생성은 Ar, Ne, Xe 등의 비활성 기체에 높은 시변 전기장을 가함으로써 전자가 이온화 되어 궤적에 따라 운동하게 되고 다시 재결합함으로써, 이온화 에너지와 전자의 운동 에너지의 합에 해당하는 에너지가 EUV 혹은 X선 대역의 빛으로 발생하게 된다. 이런 고차 조화파 생성을 위해 전자를 이온화시키기 위해서는 최소 10^{13} W/cm² 의 광 강도가 필요하며, 현재 대략 10^{11} W/cm² 의 광강도를 갖는 펄토초 레이저는 고차 조화파 생성을 위한 최소 광강도를 만족시키기 위해 외부 공진기를 이용한 광학적 증폭인 CPA(chirped pulse amplification) 방법을 이용하고 있다.

본 연구에서는 기존의 제안된 1~2개의 광학적 증폭기를 구성하는 대신 간단한 구조의 미세 패턴에 의한 근접장 증폭을 유도하여 고차 조화파 생성을 위한 최소 광 강도인 10^{13} W/cm²을 만족시키고자 한다. 이를 통하면 펄토초 레이저 이외의 다른 공진기나 광학적 장치 없이 간단한 미세 패턴만으로도 가간섭 EUV를 생성할 수 있기 때문에 전체 시스템의 구성에서나 다양한 측정 대상에 간단히 적용할 수 있다.

이러한 근접광 증폭을 위해 bow-tie 형태의 구조가 배열로 이루어진 미세 패턴을 설계 및 제작하였다.^(2,3) 이 때, 고려해야 할 설계 변수는 bow-tie의 두께(t), 두 삼각형 사이의 간격(d), 삼각형의 높이(h) 와 각도(a)이다. 입사되는 펄토초 레이저의 광 강도가 10^{11} W/cm²이고, 고차 조화파 생성을 위해 필요한 최소 광 강도가 10^{13} W/cm² 이므로, 근접광 증폭은 최소 100배 이상 이어야 한다. 그리고 가스와의 상호작용을 위한 공간이 필요하기 때문에 최대 증폭값 보다는 삼각형 꼭지점 사이의 일정영역에서 100 배 이상의 증폭이 발

생하는 것을 목표로 하여 FDTD 방법을 통해 최적화 하였다. 여러 번의 반복 시뮬레이션을 통해 얻어진 최적값은 두께(t)가 50 nm, 두 삼각형 사이의 간격(d)이 20 nm, 삼각형의 높이(h)와 각도(a)가 각각 175 nm, 30도이다. 이를 통해 bow-tie 구조물의 약 $60 \text{ nm} \times 50 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}$ 영역 내에서 최소 100 배 이상의 증폭비를 갖으며, 최대 증폭비는 마주보고 있는 삼각형의 꼭지점에서 약 500 배 이상이 되도록 설계하였다. 이를 바탕으로 Focused ion beam 방법을 통해 2차원으로 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 의 영역 내에서 bow-tie 구조물을 배열하였고, 입사되는 빛의 편광 방향으로 200 nm의 피치(pitch)를 갖고, 그 수직 방향으로 500 nm의 피치를 갖도록 하였다. Fig. 1과 같이 펄스 레이저는 다른 광학적 증폭 장치 없이 바로 미세 패턴에 집광되어 2~3 μm 의 영역에 초점이 맺히고, 그 구조물 내에 대략 50 개 정도의 bow-tie 구조물에서 빛이 증폭되어 고차 조화파를 생성한다. 이를 통해 얻어진 고차 조화파는 최대 17차까지 관찰할 수 있었으며, 파장으로 약 47 nm에 해당한다.⁽⁴⁾

본 연구는 다양한 응용분야에 간단한 구조를 갖는 광원을 확보하는데 있어 중요한 의미를 갖으며, 이를 통해 실험실 단계에서 구현되었던 여러 원리들을 실제 적용성을 높이기 위해 실험적으로 구현했다는 데 의의를 갖는다. 향후 연구로는 여러 가지 가스에 대한 고차 조화파 효율성 검증과 가스 압력에 따른 변화 및 새로운 구조의 미세 패턴을 통해 원하는 고차 조화파를 생성할 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

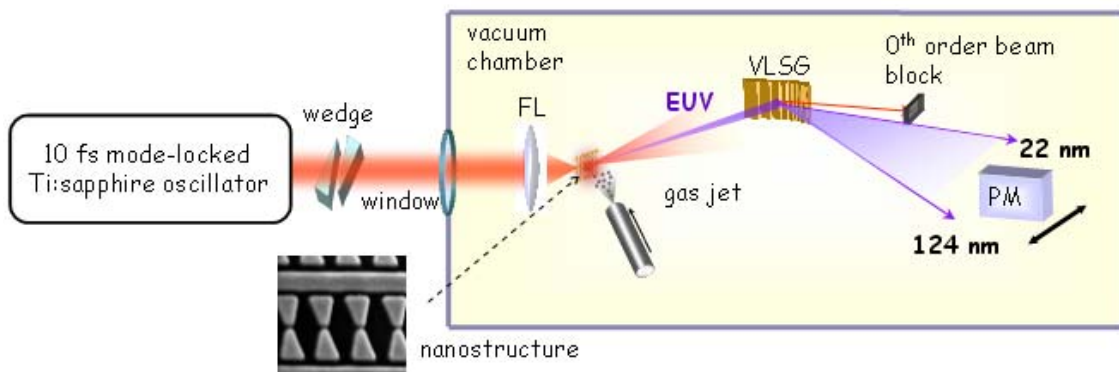


Fig. 1 Optical layout of High-harmonic generation

1. Chang, Z., Rundquist, A., Wang, H., Murnane, M. M., and Kapteyn, H. C., "Generation of Coherent Soft X Rays at 2.7 nm Using High Harmonics," *Physical Review Letters*, 79(16), 2967-2970 (1997)
2. Onuta, T., Waegele, M., DuFort, C. C., Schaich, W. L., Dragnea, B., "Optical Field Enhancement at Cusps between Adjacent Nanoapertures," *Nano Letters*, 7(3), 557-564 (2007)
3. Jin, E. X. and Xu, X., "Enhanced optical near field from a bowtie aperture," *Applied Physics Letters*, 88, 153110-1-3 (2006)
4. Kim, S., Jin, J., Kim, Y.-J., Park, I., Kim, Y., "High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement," *Nature*, 453, 757-760 (2008)