

# 가간섭 EUV 생성을 위한 미세 패턴의 설계 및 제작 Design and Fabrication of Nano-devices for coherent EUV generation

\*진종한<sup>1</sup>, 김승철, 박인용, #김승우

\*J. Jin, S. Kim, I. -Y. Park, #S. -W. Kim (swk@kaist.ac.kr)

<sup>1</sup>KAIST BUPE 연구단

Key words : nano-device, filed enhancement, coherence EUV

## 1. 서론

EUV 대역은 가시광 대역인 400 nm ~ 700 nm 의 파장 보다 짧은 영역으로, 빛을 이용한 정밀 측정에서 파장의 크기에 의해 제한되는 회절한계에 의한 측정 분해능을 향상시킬 수 있으며, 이를 수 nm 수준의 파장을 갖는 X 선 영역까지 확장을 함으로써 X 선의 좋은 투과 특성을 이용하여 생명공학에서의 미세 측정이나 비파괴 검사에까지 적용할 수 있다. 이런 EUV 및 X 선을 이용하여 측정을 수행할 때 짧은 파장 못지 않게 고려해야 할 부분이 가간섭성(coherence)이다. 가간섭성은 빛이 시간 및 공간상에서 잘 정의된 위상관계를 통해 얻어낼 수 있으며, 이런 가간섭성이 좋은 광원으로 간섭 및 회절 현상을 적용한 정밀 측정이 가능하다.

EUV 및 X 선을 생성하는 방법은 여러 가지가 존재하며 널리 사용된 방법 중의 하나가 가속기를 이용하는 방법이다. 하지만 가속기를 통한 EUV 및 X 선 생성의 경우 큰 광량을 얻을 수 있으며, 동시에 다양한 여러 파장대역을 얻을 수 있는 장점은 있으나, 시설 자체의 크기가 아주 방대하고 고가의 시설이므로 실험실 단계에서 간단히 구성할 수 없으며 생성된 빛의 가간섭성 또한 제약이 있는 단점이 있다. 이를 극복하는 방법으로 최근에는 펨토초 레이저를 이용한 고차 조화파 생성 방법이 제안되어 비교적 작은 크기의 실험 장치로써 가간섭성 EUV 및 연 X 선을 생성할 수 있다<sup>1</sup>.

고차 조화파 생성은 Ar, Ne, Xe 등의 비활성 기체에 높은 전기장을 가함으로써 전자가 이온화 되어 궤적에 따라 운동하게 되고 다시 재결합함으로써, 재결합에너지가 EUV 혹은 X 선 대역의 고차 조화파를 발생시키게 된다. 이런 고차 조화파 생성을 위해 전자를 이온화시키기 위해서는 최소 10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup> 의 광 강도가 필요하며, 현재 짧은 펄스의 높은 침투 광량을 갖는 펨토초 레이저를 외부 공진기를 이용한 광학적 증폭기인 CPA(chirped pulse amplification) 방법을 1~2 개 직렬로 연결하여 증폭하면 가스 원자를 이온화시키기에 충분한 광량을 만족시키게 된다.

본 연구에서는 앞서 제안된 1~2 개의 광학적 증폭기를 구성하는 대신 간단한 구조의 미세 패턴을 이용하여 근접장 증폭을 유도하여 고차 조화파 생성을 위한 최소 광 강도인 10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup> 을 만족시키고자 한다. 이를 통하면 펨토초 레이저 이외의 다른 공진기나 광학적 장치없이 간단한 미세 패턴만으로도 가간섭 EUV 를 생성할 수 있기 때문에 전체 시스템의 구성에서나 다양한 측정 대상에 간단히 적용할 수 있다는 장점을 갖는다. 일반적으로 10 fs 의 펄스폭을 갖고 평균 에너지가 100 mW 수준의 펨토초 레이저의 경우 대물렌즈를 통해 집광을 하게 되면 10<sup>11</sup> W/cm<sup>2</sup> 수준의 광 강도를 얻을 수 있으므로, 가스 원자의 이온화를 위해서는 광량 기준으로 10~100 배 수준의 근접장 증폭을 유도해야만 하며, 본 논문에서는 이를 구현하고 충족시키기 위한 Bow-tie 형상의 미세 패턴을 설계 및 제작하고자 한다.

## 2. 기본 이론

고차 조화파 생성(High-order Harmonic Generation, HHG)은 가스에 강한 레이저 빛을 집광시킴으로써 처음 관찰된

이후, 좋은 가간섭 특성과 실험 구성의 간단함으로 인해 EUV(extreme ultra-violet) 및 연 X 선의 광원을 펨토초 레이저의 응용 분야로 널리 사용되고 있다. 고차 조화파 생성을 가장 간단히 설명하는 방법은 고전적인 3 단계 모델(three-step model)을 통해서 이다. 처음 단계는 가스의 원자(atom)의 전자(electron)가 강한 레이저 빛을 통해 낮아진 쿨롱 장벽(Coulomb barrier)을 통해 터널 이온화(tunnel ionization)된다. 다음 단계에서는 이온화된 원자가 강한 레이저 빛에 의해 가속되고 자유전자(free electron)의 일반적인 궤적에 따라 운동한다. 마지막 단계에서 가속된 자유전자가 궤적을 따라 운동한 후 다시 가스 원자와 재결합하면서 고차 조화파를 생성하게 된다. Figure 1 은 고차 조화파 생성에 대한 3 단계 모델의 개념도이다. 이때, 가스 원자의 전자를 이온화시키기 위한 최소 에너지는 일반적으로 10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup> 로 알려져 있으며, 이를 통해 얻을 수 있는 고차 조화파의 차수는 식(1)을 통해 간단한 계산으로 예측할 수 있다.

$$\hbar\nu = I_p + 3.17 U_p \quad (1)$$

여기서,  $\hbar\nu$  는 발생하는 최고차수 고차 조화파의 에너지,  $I_p$  는 원자의 이온화 포텐셜 에너지(ionization potential energy),  $U_p$  는 ponderomotive 포텐셜 에너지이다<sup>1,3</sup>.

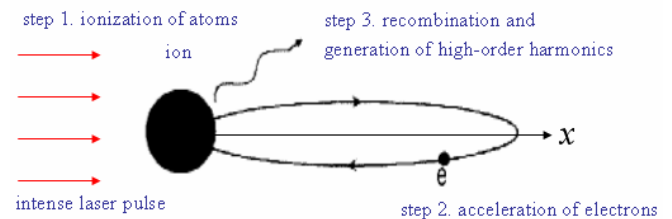


Fig. 1 Basic concept of high-order harmonic generation based on classical three-step model.

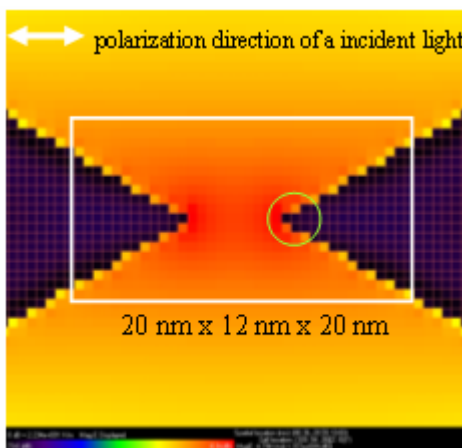
근접광 증폭(field enhancement)은 기본적으로 빛에 의한 자유 전자들의 공진에 의해 발생한다. 즉, 빛의 파장보다 작은 영역에서 Au, Ag, Al 과 같은 높은 유전상수(dielectric constant,  $\epsilon$ )을 갖는 물체에 빛이 입사하게 되면 입사된 빛의 전기장에 의해서 물체 내부의 자유 전자들이 움직이게 되고 충분히 작은 영역에서 자유 전자들이 공진하며 이동하는 시간이 빛의 주파수와 일치하게 되면 탐침과 같이 전자들이 국부적으로 모이는 곳에서 빛의 증폭이 일어난다. 이때 증폭 비율은 물체의 유전상수  $\epsilon$ , 탐침의 형태 및 크기에 따라 달라지며 입사하는 빛의 파장에도 영향을 받게 된다. 일반적으로 은(Ag), 알루미늄(Al)이 광 주파수 영역에서 가장 높은 유전 상수를 가지고 있는 것으로 알려져 있으나 은, 알루미늄의 경우 공기 중에서 쉽게 산화하기 때문에 오히려 산화 층에 의한 영향으로 증폭되는 크기가 떨어지는 단점을 갖고 있어 본 연구에서는 금(Au)를 통해 근접장 증폭을 위한 미세 구조를 설계 및 제작 하고자 한다. 이때, 근접광 증폭을 유도하기 위한 구조들로는 간단한 구형 입자, 타원체, 원기둥 등의 형태를 고려할 수 있지만, 최근

나노 구조물의 제작 기술을 고려하여 효율면에서 근접광 증폭이 유리한 모양이 bow-tie 형태로 보고된 바 있으며<sup>4,5</sup>, 본 연구에서는 bow-tie 형태를 기본으로 근접장 증폭을 위한 구조물을 설계 및 제작하였다.

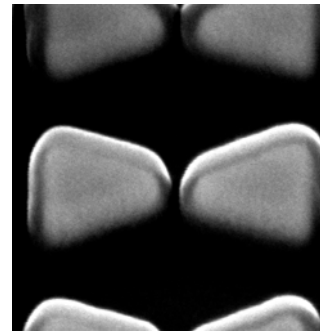
Bow tie 형태의 나노 구조물의 설계를 최적화 하기 위해 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 해석적으로 시뮬레이션 할 수 있는 FDTD(Finite Difference Time Domain)방법을 적용하였다. 이는 Yee cell 이라고 정의된 작은 요소로 나눈 뒤 각 요소에서 시간영역에 따른 Maxwell 방정식을 푸는 방법이다. FDTD 방법의 경우 입사되는 빛의 파장보다 작은 영역에서도 해석이 가능하며 계산 알고리즘이 간단하여 계산 속도가 빠르고 특히 펄스 레이저와 같은 넓은 주파수 영역을 갖는 광원에 대해서도 한번에 해석이 가능한 장점을 갖고 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과

Bow tie 형태의 구조에서 고려해야 할 설계 변수는 두께(t), 두 삼각형 사이의 간격(d), 삼각형의 높이(h) 와 각도(a)이다. 입사되는 펄스 레이저의 광 강도가  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> 이고, 고차 조화파 생성을 위해 필요한 최소 광 강도가  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 이므로, 근접광 증폭은 최소 100 배 이상 이어야 한다. 그리고 가스와의 상호작용을 위한 공간이 필요하기 때문에 최대 증폭값보다는 삼각형 꼭지점 사이의 일정영역에서 100 배 이상의 증폭이 발생하는 것을 목표로 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, 30 도이다. 이를 통해 Fig. 2(a) 와 같이 20 nm × 12 nm × 20 nm 영역 내에서 최소 100 배 이상의 증폭비를 갖으며, 최대 증폭비는 마주보고 있는 삼각형의 꼭지점에서 약 500 배이다. 펄스 레이저의 집광 시, 직경이 대략 2~3 μm 이므로 아래와 같은 구조물이 대략 50 개 정도가 들어가도록 배열로 배치하였고, Fig. 2(b) 와 같이 FIB(forced ion beam) 공정을 통해 제작하였다. 2 차원으로 배열된 bow-tie 는 10 μm × 10 μm 의 영역 내에서 입사되는 빛의 편광 방향으로 200 nm 의 피치(pitch)를 갖고, 그 수직 방향으로는 500 nm 의 피치를 갖고 있다. Fig. 2(b) 는 피치가 200 nm 인 나노 구조물의 SEM(scanning electron microscopy)의 이미지(image)이다.



(a) Simulation result of a bow-tie structure. The polarization direction of a incident light is horizontal, and the maximum enhancement is observed at the vertex of both triangles. The volume of 20 nm × 12 nm × 20 nm can be achieved the field enhancement of more than 100



(b) SEM image of the bow-tie array structure. The thickness of gold layer is 50 nm, the height of the bow-tie element is 175 nm, the angle of apex is 30 degree, and the gap between apexes of the bow-tie is 20 nm. It is fabricated by forced ion beam method with precise control conditions.

Fig. 2 Simulation and fabrication of bow-tie structures for field enhancement

### 4. 결론

펄스 레이저를 이용하여 고차 조화파 생성은 가간섭 EUV 광원을 얻기 위한 하나의 대표적인 방법으로 널리 알려져 있다. 이를 위해서는  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>의 높은 광 강도를 갖는 펄스가 필요하며, 펄스 레이저와 CPA(chirped pulse amplification) 방법은 이를 만족하는 대표적인 방법이다. 본 연구에서는 좀 더 간단한 구조로 여러 분야에 널리 적용할 수 있도록 근접장 증폭 원리를 이용한 bow-tie 형태의 미세 구조물을 이용함으로써 기존의 1 단 혹은 2 단의 CPA 를 대체하여 더욱 간단한 형태의 가간섭 EUV 광원을 생성할 수 있을 것으로 기대한다. EUV 의 특성과 가간섭 및 회절 성질을 이용하여 향후 생명공학, 비파괴검사 등에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering)연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

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. Balcou, P., et al., "High-order-harmonic generation: towards laser-induced phase-matching control and relativistic effects," *Applied Physics B*, **74**, 509-515, 2002.
3. Tempea, G., Brabec, T., "Optimization of high-harmonic generation," *Applied Physics B*, **70**, S197-S202, 2000.
4. Onuta, T., Waegle, M., DuFort, C. C., Schaich, W. L., Dragnea, B., "Optical Field Enhancement at Cusps between Adjacent Nanoapertures," *Nano Letters*, **7**(3), 557-564, 2007.
5. Jin, E. X. and Xu, X., "Enhanced optical near field from a bowtie aperture," *Applied Physics Letters*, **88**, 153110-1-3, 2006