

# 표면 플라즈몬 증강을 위한 3차원 경사진 도파로의 설계 및 제작

## 3D tapered waveguide design and fabrication for surface plasmon enhancement

\*박인용, 김승철, 최준희, 이동협, 김현진, #김승우

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

KAIST 극초단광학 초정밀기술 연구단

Key words : Surface plasmon, tapered waveguide, Finite-Difference Time-Domain, Focused ion beam

### 1. 서론

최근에 광학에서 가장 많은 연구가 되고 있는 것이 회절한계 미만으로 빛을 효율적으로 모으고 모아진 빛을 도파시키는 방법이다. 이와 같이 회절한계 미만 크기에서 빛을 다룰 수 있는 방법으로 가장 주목을 받고 있는 것이 SPP(Surface Plasmon Polariton)이다<sup>1</sup>. SPP는 유전률의 실수부 부호가 다른 두 물질의 경계면에서 전자기파에 의해 유도 및 생성되는 전자들의 집단 움직임으로서, 경계면을 따라 진행할 수 있다. 이때 도파로의 형상을 표면 플라즈몬파가 적은 손실을 가지며 도파할 수 있도록 설계하면 효율적으로 표면 플라즈몬을 회절 한계 미만 크기 영역에 강하게 집중시킬 수 있다<sup>2</sup>. 이와 같이 플라즈몬 현상을 이용하면 국소 영역에 빛을 모을 수 있을 뿐만 아니라 모아진 영역에서 전자기장의 크기가 증강되게 되어, 고효율 센서, 라만 분광학, 비선형 광학 그리고 높은 공간 분해능의 결상계 등 많은 응용분야에 적용될 수 있다. 기존에는 도파로 제작방법의 한계 때문에 평면에 경사진 도파로를 제작하거나, 광섬유를 뿔족하게 늘여 금속을 증착하고 또는 실리콘의 비등방성 성질을 이용하여 주로 제작하였다. 하지만 실리콘의 비등방성을 이용하게 되면 경사각도가 항상 70°로 고정된 사각형모양의 도파로만 제작이 가능하므로 목적에 맞는 효율적인 도파로를 제작하기가 힘들다.

본 연구에서는 기존의 표면 플라즈몬 도파로 제작의 한계를 극복하고자, 효율적으로

표면 플라즈몬을 증강할 수 있는 타원뿔 형태의 도파로를 설계하고, 집속이온빔으로 실제 제작하였다.

### 2. 경사진 도파로의 설계

효율적으로 표면 플라즈몬을 증강할 수 있는 도파로를 설계하기 위하여 복잡한 형상에서의 전자기장 해석에 널리 쓰이고 있는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법을 이용하였다. 시뮬레이션을 할 때의 도파로의 재질은 적은 손실때문에 플라즈몬 연구에 널리 사용되는 은(Ag)으로 설정하였고, 입사되는 레이저는 중심파장이 800 nm 이고 펄스폭이 10 fs 인 펨토초 레이저로 하였다. 도파로의 설계변수로는 도파로의 길이(h), 경사각도( $\theta$ ), 출구 구멍크기(d) 그리고 단면 형상을 결정하는 두 축 지름의 비율(a/b)로 설정하고, 각 변수 값을 변화시키면서 가장 큰 증강 값을 갖는 변수 값들을 선택하였는데 표 1 과 같다.

Table 1 Chosen design parameters of tapered waveguide by FDTD simulation

Parameter	Taper angle ( $\theta$ )	Waveguide length (h)	Exit diameter (d)	Elipticity (a/b)
Value	14°	9 $\mu$ m	100 nm	0.5

Figure. 1 에서 FDTD 시뮬레이션을 통해 얻은 증강 값과 함께 도파로 내부에서의 표면 플라즈몬 분포를 보여주는데, 800 nm 의

파장보다 작은 도파로의 끝부분까지 표면 플라즈몬이 도파하여 최대 350 배까지 증강된 것을 알 수 있다.

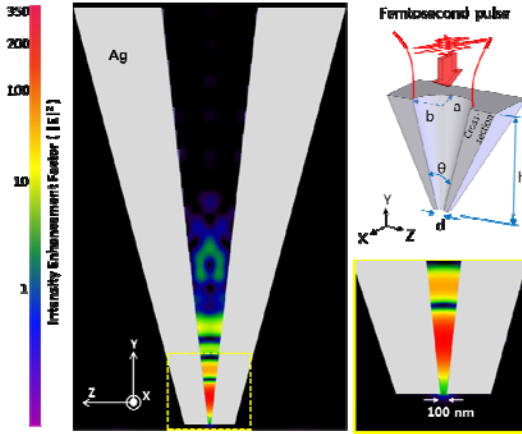


Fig. 1 Enhanced electric field distribution inside the tapered waveguide by FDTD simulation and design parameters.

### 3. 경사진 도파로의 제작

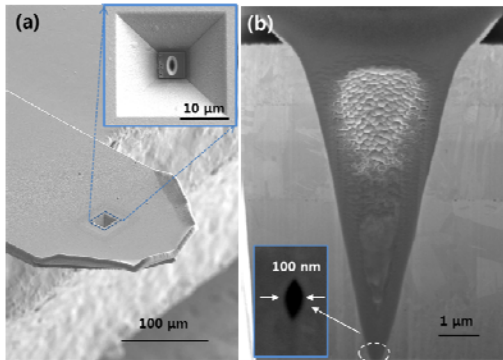


Fig. 2 Scanning electron microscope images of fabricated tapered waveguide, (a) NSOM cantilever and top view of inlet aperture, (b) Cross-section view of waveguide and bottom view of exit aperture.

FDTD 시뮬레이션으로 설계한 도파로의 형상대로 제작하기 위하여 집속이온빔을 이용하였다. 집속이온빔은 최근 나노/마이크로

구조물 제작에 많이 쓰이는 것으로 nm 크기의 정확도로 제작할 수 있을 뿐만 아니라 전자주사현미경이 함께 설치되어 있어 제작과 동시에 결과물을 관찰할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 설계한 도파로는 14° 경사각도를 가지면서 비교적 큰 종횡비를 가지므로 순차적으로 크기가 작아지는 31 장의 타원모양 그림을 집속이온빔 장치에 저장하고 크기순서대로 가공하여 제작하였다. Figure. 2 와 같이 상용품인 근접장주사현미경에 쓰이는 탐침에 제작하여 향후 주사현미경시스템에 쉽게 접목할 수 있도록 하였다.

### 4. 결론

본 연구에서는 FDTD 시뮬레이션으로 표면 플라즈몬을 효율적으로 유도하고 증강하는 경사진 도파로를 설계하고, 플라즈몬 증강값을 계산하였으며, 설계변수 값대로 근접장탐침 끝부분에 도파로를 집속이온빔으로 제작하였다. 기존의 방법과 달리 집속이온빔을 이용하여 선택된 도파로의 형상 및 경사각도를 정확하게 제작할 수 있음을 보였다. 본 연구에서 제작된 도파로는 높은 증강 값을 가지므로 높은 전자기장 크기가 요구되는 비선형광학현상에 이용할 수 있을 것으로 기대되며<sup>3</sup>, 더불어 탐침형태로 제작이 되었으므로 근접장주사(near field scanning)방식에 바로 적용하여 사용할 수 있는 장점도 있다.

### 후기

본 연구는 교육과학기술부 도약연구지원 사업의 지원을 받아 한국과학기술원 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Maier, S. A., "Plasmonics: Fundamentals and Applications," Springer Series, 2007.
2. Gramotnev, D. K., and Bozhelonyi, S. I., "Plasmonics beyond the diffraction limit," Nat. Photonics, **4**, 83-91, 2010.
3. Kim, S., Jin, J., Kim, Y., Park, I., Kim, Y., and Kim, S., "High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement," Nature, **453**, 757-760, 2008.