

파장보다 작은 금속 구멍의 회절에서 나타나는 표면 효과

Surface-mediated interference in the radiation

from a sub-wavelength-sized aperture in a metal plane

김세헌, 신동재, A.Chavez-Pirson*, 정승태, 이용희

한국과학기술원, *NTT 기초연구소

kalt@cais.kaist.ac.kr

파장보다 작은 구멍을 통한 빛의 회절을 다루는 문제는, 최근 근접장 광학의 발달과 더불어서 많은 연구가 되고 있다. 이러한 작은 구멍은 근접장 주사 광학 현미경(NSOM)에서의 탐침(probe)으로 사용되므로, 여기에서 일어나는 빛과 탐침의 상호작용을 잘 이해하는 것이 중요하다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 작은 구멍 주변에 선형 스크래치가 있을 때, 구멍을 통한 빛의 회절 분포를 먼 장(far field) 영역에서 관측하였다. 먼 장 분포를 분석해 본 결과, 구멍 주변의 선형 스크래치에 의한 효과가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 구멍 주변에서 발생한 표면파가 금속 표면을 따라가면서, 주변의 스크래치와 상호 작용한 결과로 보인다.

그림 1(a)는 실험 장치의 모습을 개략적으로 나타낸 것이다. 실험에 사용된 탐침은, 작은 구멍에서의 고출력 투과율을 위해서 최근 개발된 것으로⁽²⁾, 끝이 뾰족한 광섬유에 백금과 니켈이 입혀져 있다. 그림 1(b)는 금속 구멍의 주사 전자 현미경 사진을 보여준다. 그림에 표시된 막대의 길이가 200nm이고, 실험에 사용된 빛의 파장이 488nm와 810nm이므로 파장보다 작은 구멍임을 알 수 있다. 그림 1(c)는 구멍 주변 금속 표면의 지형을 층밀리기힘 탐지계(shear force detector)를 사용하여 측정한 것을 보여준다. 여기에서 선형 스크래치의 대략적인 주기가 0.5 μm 이고, 깊이가 15nm 정도 된다는 것을 알 수 있었다. 먼 장 분포의 측정은 고체각 주사기(solid angle scanner)를 사용하여, (θ, ϕ) 각 지점의 빛의 세기 분포를 측정하였다⁽³⁾. 측정한 데이터는 $x = \theta \cos \phi$, $y = \theta \sin \phi$ 인 변환을 사용하여, 그림 2와 같이 나타내었다.

그림 2는 두 가지 입사 편광 방향과 두 가지 빛의 파장에 따른 먼 장 분포의 모습을 보여준다. 스크래치에 수직하게 편광된 빛이 입사하는 경우(그림 a,d)에는 간섭 무늬와 같은 것이 나타남을 볼 수 있다. 하지만 평행하게 빛이 입사하는 경우(그림 c,d)에는 간섭 무늬가 보이지 않는다. 간섭무늬를 더 잘 보기 위해서 a와 d의 데이터와 a와 d를 매끄럽게 한(smoothing) 데이터와의 차이를 구했는데, 그 결과가 그림 b와 e이다. 다른 실험들에서, 구멍 주변에 스크래치가 없는 경우는 어떠한 방향의 편광에 대해서도 간섭 무늬가 나타나지 않기 때문에, 간섭무늬는 선형 스크래치 때문임을 알 수 있다. 간섭무늬가 스크래치 때문이라는 것을 확인하기 위해서, 홀로그램의 원리를 이용하여 먼 장 분포로부터 근접 장 분포를 역추정 하여 보았다. 이 방법은 작은 구멍 주변에서 나오는 빛인 참조파(reference wave)와 선형 스크래치에서 발생하는 것으로 추정되는 빛과의 간섭으로 먼 장 분포를 설명하는 것이다. 근접 장 분포를 역으로 얻기 위해서는 스크래치에서 발생하는 빛을 제외하고서, 참조파와 먼 장 측정 분포만을 가지고 다음 식으로 계산하면 된다.

$$F_{nf}(\vec{x}) = \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \sqrt{I_{ff}(\theta, \phi)} \sqrt{I_{ffsm}(\theta, \phi)} \exp[-ik(R - \vec{n} \cdot \vec{x})]$$

여기에서 I_{ff} , I_{ffsm} , \vec{n} , k , R 은 각각 먼 장 세기, 참조파의 세기, 반지름 방향의 단위 벡터, 전파 벡터, 원점과 먼 장 측정 위치까지의 거리를 나타낸다.

그림 3이 위 식으로 계산된 근접 장 영역의 분포를 보여준다. 입사 편광이 스크래치에 수직일 때, 선형 스크래치가 나타남을 볼 수 있다. 또한 구멍 주변의 점 결함들도 나타남을 알 수 있다. 여기에서 패턴은 \vec{x} 가 $-\vec{x}$ 로 바뀌더라도 변하지 않게 되는데, 이것은 게이버(Gaber)홀로그램 문제에서 나타나는 일반적인 현상이다⁽⁴⁾. 입사한 빛의 파장이 길어질수록 구멍 주변의 더 넓은 영역이 간섭 무늬에 기여하게 됨을 볼 수 있다. 정량적으로 생각하면, 여기에서 관찰되는 사실과 표면 플라즈몬(plasmon) 파가 보여주는 행동은 일치한다. 플라즈몬 파는 편광 방향을 따라서 전파되며, 빛의 파장에 비례하는 전파 길이를 갖고 있다.

1. D.J.Shin, A.Chavez-Pirson, and Y.H.Lee, Opt. Lett. 25, 171 (2000)
2. S.T.Jung, D.J.Shin, Y.H.Lee, Appl. Phys. Lett (submitted)
3. D.J.Shin, A.Chavez-Pirson, and Y.H.Lee, J.Microsc.(Oxford) 194, 353 (1999)
4. J.W.Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGRAW-Hill, Singapore, 1996), Chap 9.

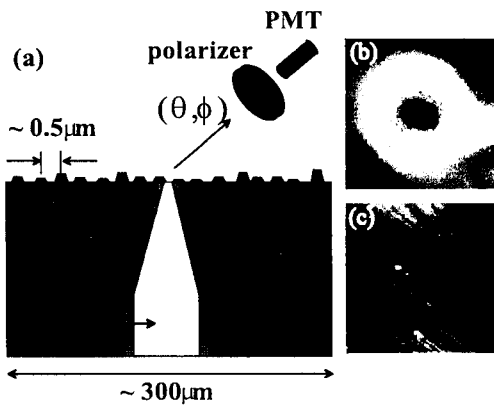


그림 1 실험 방법

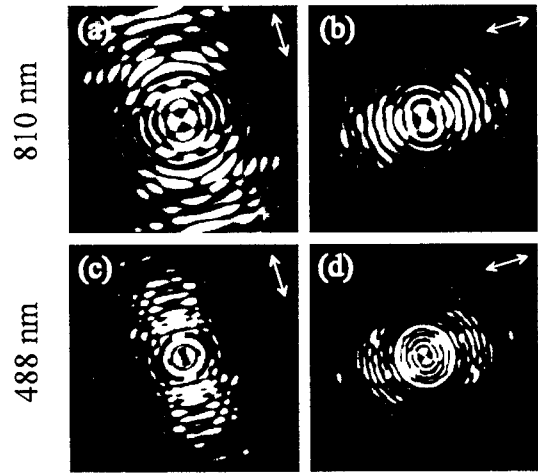
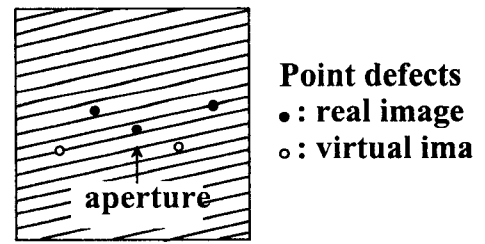


그림 3 역추정된 근접장 분포

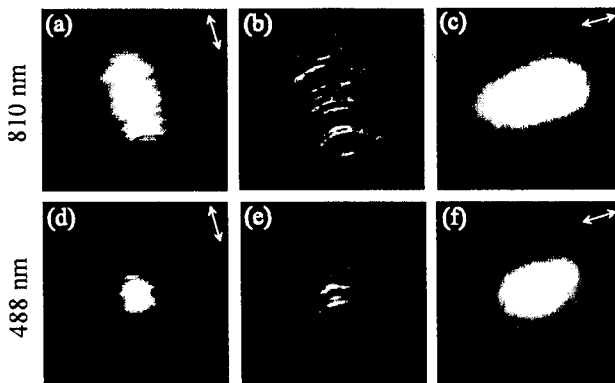


그림 2 먼 장 분포