

◆특집◆ 나노 광소자 응용 및 평가기술

근접장 나노광학 기술과 응용

장원석*, 황경현*, 김진범**, 나석주**

Near-field Nano-Optics and Its Applications

Won Seok Chang*, Kyung Hyun Whang*, Jin Beom Kim** and Suck Joo Na*

Key Words : Near-field (근접장), Near-field Scanning Optical Microscope (근접장주사현미경), Aperture(개구부), Apertureless-NSOM(비개구 근접장주사현미경), Nanoscale Patterning (나노패터닝).

1. 서론

렌즈를 사용하는 광학현미경의 성능은 그 기능이 꾸준히 발달되어 왔음에도 불구하고 대물렌즈의 개구수 (Numerical Aperture; NA)에 의하여 회절한계 등으로 다음의 식과 같이 표현되는 해상도의 한계를 갖는다.

$$\Delta x > \frac{0.61 \lambda}{NA} \quad (NA = n \sin \theta)$$

여기서 λ 는 광원의 파장, n 은 매질의 굴절율, θ 는 렌즈에서 집속된 빛 중에서 최외각 것과 광축이 이루는 각도이다. 따라서 $n=1.5$ 인 오일을 사용하고 대물렌즈의 $\sin \theta$ 값이 0.9 인 현미경의 NA 는 1.35 이므로 가시광 영역에서는 약 $0.2 \mu m$ 가 광학현미경이 가질 수 있는 최대 해상도가 된다. 물체와 렌즈가 서로 파장에 비해 상당히 멀리 떨어져 있는 상태에서 빛을 조사하거나 물체에서의 빛의 변화를 측정한다는 개념에서 일반적인 렌즈를 사용한 광학계는 먼장 광학계 (Far-field

optics; FFO)의 범주에 포함된다. 이러한 FFO 의 한계를 뛰어넘기 위해 제안된 것이 바로 근접장 광학(Near-field Optics; NFO)이다.

근접장 광학 분야는 1980 년대 후반부터 태동되었으며, 이론적으로는 1900 년대 초반부터 이론적인 논문이 발표되었다. 광학에서 far-field 를 이용하는 경우 물체의 크기가 $\lambda / 2$ 보다 작은 경우에는 분해할 수 없다고 알려져 있었으나¹, E. A. Syng에 의해서 $\lambda / 2$ 보다 작은 물체의 경우에도 광학적으로 분해가 가능하다는 이론이 주장되었다². 그 후 Bathe 에 의해서 원형 개구부(circular aperture)에 대한 빛의 회절이론이 전개되었으며³, 추후에 C. J. Bowkamp⁴ 에 의해서 이론이 약간 수정되었다. 중요한 점은 아주 작은 핀홀 혹은 개구부(aperture)를 이미징하려는 대상(object)이 있는 표면에 거의 $\lambda / 2$ 이하로 가까이 가져가는 것이다. 이는 근접장이 표면파로 50nm 이상의 거리에서는 소멸되어 분해능을 얻을 수 없기 때문인 것으로 나타나 있다⁵.

근접장 광학 현미경에 대한 이론은 1920 년대 초반에 개발이 되었고, 이런 장치의 가능성이 예측되었음에도 불구하고, 장치구현에 필수적인 부품들의 구현이 당시의 기술로는 불가능하여 연구가 더 이상 진전되지 않다가, 1980 년대 초반에 이르러서야 연구자들의 관심을 받게 되었다. 필요한 장치 중의 하나가 서브 마이크로 크기의 개구부를 만드는 것이었고, 개구부를 만든 후 이것을 표면

* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 나노공정팀

Tel. 042-868-7134, Fax. 042-868-7149

Email paul@kimm.re.kr

레이저 응용 및 미세 가공 시스템, 나노프로브를 이용한 근접장 현미경 측정 및 패터닝 기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 한국과학기술원 기계공학과

에 어떻게 수 마이크로 미터 이하로 접근 시킬 것인가였다. 초기의 연구자들은 당시 사용이 가능했던 piezoelectric actuator 를 이용하였다. 탐침을 제작하기 위해서, 막 발전되어 생산되던 광섬유에 금속 코팅을 하여 수십 나노미터 크기의 개구부를 만들었고, 다양한 근접장을 형성하여 그 특징을 관찰하기에 이르렀다.

근접장 광학 이미지를 얻기 위해서는 근접장 광원이 필요하고, 근접장 광원을 관찰하고자 하는 대상에 광원의 파장보다 더 가까운 거리로 안전하게 접근시키는 기술이 필요하다. 1980년대 주사터널현미경(Scanning Tunneling Microscopy; STM)⁶이 개발되고, 연이은 원자간력현미경(Atomic Force Microscopy; AFM)⁷의 개발로 근접장 광원을 탐침의 표면에 가까이 접근시키는 것이 가능해졌으며, 이를 바탕으로 급속한 발전을 이루게 된다.

1990년대는 주로 aperture type 의 근접장주사현미경(Near-field Scanning Optical Microscopy; NSOM)을 개발하였으며, 또한 shear force 피드백(feedback) 기술⁸의 개발로 좀 더 발전한 NSOM 을 사용할 수 있게 되었다. 또, 시계에 기준신호발생의 목적으로 채용된 수정 튜닝포크(quartz crystal tuning fork)의 이용으로 근접장 광학 현미경의 질이 한 단계 향상되었다. 수정 튜닝포크를 원자간력의 상호작용력을 검출하는데 사용함으로써, 고진공 챔버 혹은 저온 챔버 내부에 배치하는데 이점을 갖게 되었으며, 저소비전력으로 인한 저온 실험에서의 온도상승문제도 해결할 수 있었다. 1990년대는 이런 기반 기술들을 바탕으로, 근접장 광학의 기본 요소인 근접장 광원의 크기를 줄이고, 광원의 빛의 세기를 높이는데 주력하였다. 특히 광섬유를 이용한 개구부 형 탐침 제작의 경우 1990년대를 지나면서 거의 모든 기술이 개발 완료되었고, 현재 상용화된 광섬유 탐침을 구입할 수 있게 되었다. 에칭 용액에 의한 광섬유의 에칭방법은 이제 하나의 확립된 기술이 되었으며, 단순히 에칭 용액에 담가서 탐침의 모양을 설계하는 것뿐 아니라, 보호막을 이용한 튜브에칭법도 개발된 것으로 보고되었다. 이러한 개구부 형 탐침의 경우 빛의 투과율이 1990년대 초반에는 0.1%를 넘어서지 못하던 것이, 1990년대 후반에는 ~1% 정도까지 끌어올려졌다. 또, 단일 식각(one-step etch) 공정뿐만 아니라, 다단계(multi-step etch) 식각 공정을 통하여 taper length 를 최대한 줄여서, 광 투과율을

증가시키는 방법도 소개⁵ 되었으며, 현재 개구부 형 탐침 제작에 이용되고 있다.

2000년대로 넘어오면서, 근본적으로 투과율에 한계를 결정짓는 개구부를 없애버린 apertureless 탐침을 개발하고 이를 이용한 근접장 광 현미경의 개발에 초점이 맞추어졌다. 특히, apertureless 형 탐침은 기존의 원자현미경에 이용되던 실리콘 캔틸레버(cantilever)에 금속을 코팅한 후 사용가능하기 때문에 기존의 원자현미경 장비에 약간의 변형만으로도 구현이 가능하고, 빛의 효율 자체도 개구부 형에 비해서 우수하므로, 많은 연구자들이 apertureless 형 근접장 현미경 쪽으로 방향을 바꾸어서 연구하고 있는 실정이다. 이와 더불어 기존의 개구부 형 근접장 현미경에서는 개구부 형 근접장 현미경에서는 개구부의 모양이 모두 원형이었는데, 이와는 달리 'C'자형 개구부를 갖는 탐침을 제작하여, 그 빛의 투과율이 고전적인 원형 개구부 탐침에 비해서 우수하다는 결과를 보였다. 이러한 형태의 개구부를 기존의 하드디스크의 슬라이더에 장착하여 데이터 저장장치에 응용하여 기존의 기록밀도를 끌어올리려는 노력도 있다. 또, 'I'자형 aperture 와 Bow-tie 안테나 형태의 탐침으로 비슷한 연구를 한 경우도 있다. 그러나 아직 평판에 개구부를 제작하는 단계이며, 아직 NSOM 프로브에 적용 가능한 결과는 발표되고 있지 않다.

본 논문에서는 이상에 소개한 근접장주사현미경 기술의 기본적인 원리 설명과 현재까지의 이를 이용한 관련 기술 연구동향과 그 응용 연구 결과를 설명하고 앞으로의 근접장 광학기술을 이용한 나노기술의 전망을 예측하고자 한다.

2. 근접장주사현미경

2.1 근접장주사현미경 시스템

1984년 스위스의 IBM 연구소에 있던 Pho⁹ 등은 수정을 뾰족하게 가공한 후 선단부위에 알루미늄 금속박막을 코팅한 프로브에 아르곤 레이저를 입사시켜 20nm 의 해상도를 갖는 근접장 신호를 얻는데 최초로 성공한 이후로 여러 형태의 근접장주사현미경 시스템이 연구되었으며 빛을 조사하고 수집하는 방식에 따라서 I-모드(Illumination-mode), C-모드(Collection-mode), R-모드(Reflection-mode), 그리고 Photon Scanning Tunneling microscope(PSTM)로 나눌 수 있고 프로브 개구부

의 유무에 따라서 aperture NSOM 과 apertureless NSOM 으로 나눌 수 있다. 각각의 NSOM 시스템은 그 형태와 활용범위에서 조금씩 차이가 있으나, 기본적인 측정 원리는 모두 비슷하며 일반적으로 다음과 같은 네 가지 주요한 부분으로 구성된다.

1) 나노미터 크기의 광원

과장보다 작은 크기의 개구부가 있는 근접장주사현미경의 프로브에 레이저 광원을 통과시켜 형성한다.

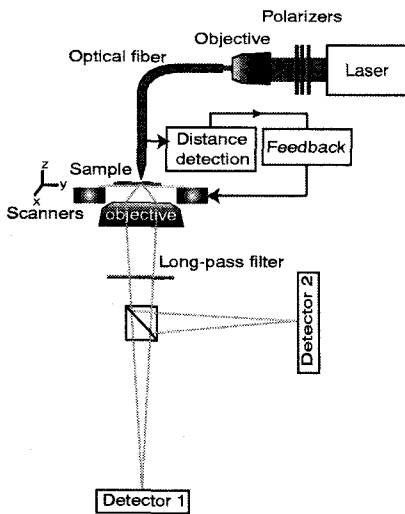
2) 광원을 시료 표면에 접근 시키는 구동부
광원을 시료표면으로부터 수 nm 의 범위로 접근시킬 수 있을 정도의 분해능이 있는 압전소자 구동부를 이용한다.

3) 피드백 메커니즘

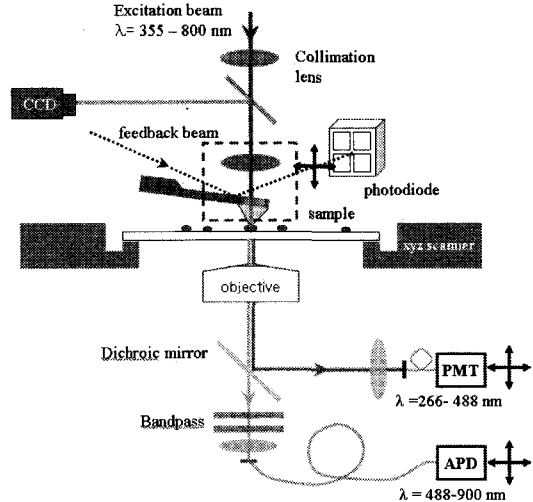
광원과 시편사이의 거리를 수~수십 nm 로 유지할 수 있는 피드백 메커니즘으로 외팔보 형식 프로브의 광학 메커니즘과 tuning fork 를 이용한 방식이 있다.

4) 근접장 광 수광부

시료 아래로 투과되는 이미지 혹은 시료 위로 반사되는 빛을 고배율 렌즈를 사용하여 PMT(Photo Multiplier Tube) 혹은 APD(Avalanche Photo-Diode)로 광을 전달하는 광학시스템으로 구성된다.



(a) Optical fiber coupled NSOM system



(b) Silicon cantilever coupled NSOM system

Fig.1 Schematic diagram of NSOM configuration

근접장주사현미경은 나노미터 크기의 광원을 시료 표면에 수 nm 의 범위로 가까이 접근시킨 상태에서 나노미터 크기의 광원으로부터 나온 빛이 시료 아래로 투과되는 빛 혹은 시료 위로 반사되는 빛을 수집하고 분석하여 시료 표면의 광학적인 정보를 분석하는 장비이다. 나노미터 크기의 광원을 사용하기 때문에 분해능이 회절한계에 의해서 결정되지 않고 광원의 크기에 의해서 결정되는 특징을 지닌다. 일반적으로 사용되는 근접장주사현미경 시스템의 구성을 광화이버와 튜닝포크를 이용한 방법과 실리콘캔틸레버와 레이저 빔 반사를 이용한 방법으로 나누어 Figure 1 에 도시하였다. 광화이버를 이용한 시스템의 경우 레이저 빔과 광화이버가 커플링이 비교적 용이하여 나노 스케일의 광을 만드는 것이 용이하나 튜닝포크의 shear force 를 이용하므로 시편과의 간극 조절이 용이하지 않은 단점이 있다. 이에 반해 원자간력현미경을 이용한 시스템의 경우 팁의 끝단과 시편사이의 간극 제어가 용이한 반면 레이저 빔을 미세한 개구부에 효율적으로 집광하고 캔틸레버 위에 반사되는 레이저 빔을 정렬하는데 복잡한 광학배열이 요구되는 단점이 있다. 최근 나노프로브 시스템을 다기능화 하고 팁의 강도가 더 큰 캔틸레버형 시스템을 개발하고 응용하고자 하는 연구가 진행 중에

있다.

2.2 근접장주사현미경의 측정 모드

근접장 광학 현미경을 빛을 조사하고 수집하는 방식에 따라서 크게 구분하여 보면 Figure 2 의 (a), (b), (c)와 같이 파장보다 작은 크기의 개구부를 갖는 프로브를 광원 혹은 센서로 사용하는 aperture NSOM 과 (d), (e), (f)와 같이 시료 표면의 아래쪽에서 임계각 이상으로 광이 입사하여 전반사할 때 발생한 표면파(evanescent wave)가 프로브 속으로 터널링(tunneling) 되는 원리를 이용한 포톤 터널링주사현미경(Photon Tunneling Scanning Microscope; PTSM) 방식이 있다.

먼저 I-모드 방식은 나노크기의 광원으로 시료 표면을 조사시키면 시료 표면에 의해서 산란되는 이미지를 시료 표면 아래쪽에서 개구수가 큰 대물렌즈로 결상시켜서 결상 부위에 핀홀과 PMT 혹은 APD 와 같이 민감도가 높은 광 검출기를 위치시켜서 측정하는 방식이다. I-모드는 신호의 해석이 간단하다는 장점이 있으나 빛을 투과시킬 수 있는 시료에 대해서만 사용할 수 있다.

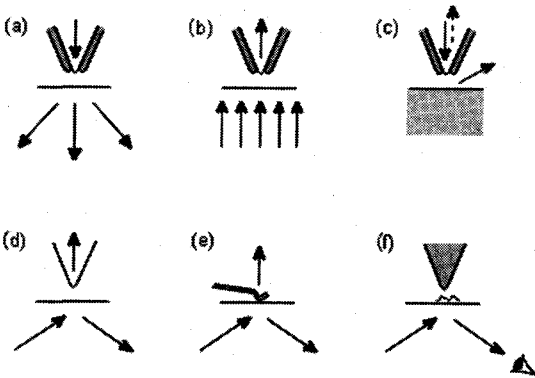


Fig. 2 The operation mode of NSOM

C-모드 방식은 시료 아래에서 빛을 조사시키고 프로브를 이용하여 빛을 모으는 것으로, I-모드 방식과 비교하였을 때 광원의 위치와 센서의 위치가 바뀌었을 뿐이지만 시료 아래로부터 오는 빛의 강도가 시료 표면으로부터 멀어지면 급격히 떨어지는 특성을 이용하여 다른 피드백 메커니즘 없이 시료 표면과 프로브 사이의 거리를 제어할 수 있고, 액상의 시료에도 쉽게 적용시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 시료 아래로부터 오는 빛이 먼저

나 흡집에 의해서 발생하는 산란과 간섭이 신호에 잡음을 주는 문제점이 있다.⁵

R-모드 방식은 불투명한 반사체를 측정할 수 있는 유일한 방식이며 외부에서 빛을 조사하고 프로브로 검출하는 방식을 ‘collection-reflection mode’라고 하고, 프로브로 빛을 조사하고 외부에서 빛을 모아 검출하는 방식을 ‘illumination-reflection mode’라고 한다¹⁰.

포톤터널링주사현미경은 위의 세가지와는 다른 원리로 작동한다. 표면파의 강도는 표면으로부터의 거리에 따라 급속히 감소되므로 프로브는 시료 표면에 매우 근접한 상태에서 주사되어야 한다. 이러한 방법은 굴곡변화가 매우 미약한 시료 표면의 지형(topology)를 관찰하는데 적절한 방법이지만 C-모드 방식 NSOM 과 마찬가지로 산란과 간섭에 의한 잡음이 심한 단점이 있다.

근접장 광학 현미경을 프로브 개구부의 유무에 따라 apertureless NSOM 과 aperture NSOM 으로 나눌 수 있다. Apertureless NSOM 은 외부에서 시료 표면에 대해서 TE 편광된 빛을 조사시킬 때 프로브와 시료표면 사이에서 일어나는 전기장 강화 현상에 의해서 측정하는 방법이며 프로브 끝에 개구부가 없으므로 aperture NSOM 프로브보다 날카로운 프로브를 만들어 사용할 수 있기 때문에 분해능이 aperture NSOM 에 비해서 뛰어나지만 측정을 위한 시스템이 복잡해지는 단점이 있다. 이는 뒤에 보다 자세히 설명하기로 한다.

2.3 개구부의 설계 및 변형

2.3.1 광섬유를 이용한 개구부 팁

대부분 근접장 탐침은 광섬유를 에칭하거나 풀링하여 그 끝단에 금속 코팅을 하여 원형의 개구부를 형성하거나 실리콘 캔틸레버의 피라미드형 탐침 끝에 원 개구부를 형성하여 illumination-collection 혹은 collection 모드에서 회절한계를 넘어서는 광학 이미지를 얻었다. 이 방법의 장점으로는 background noise 를 줄일 수 있다는 점이지만, 에칭과 금속 코팅, 그리고 개구부 형성이라는 단계를 거쳐야 하므로, 수율이 떨어지고, 재현가능한 탐침 제작을 위해서 비용이 증가하는 단점이 있다. 또, 해상도를 높이기 위해서는 개구부의 크기를 줄여야 하는데, 이는 광 투과율을 저하시켜 신호 대잡음비를 떨어뜨리게 되고, 결과적으로 이미지를 얻는데 걸리는 시간을 증가시키게 되는 문제점

이 있다. 이러한 문제점들로 인하여 개구부 형 광섬유 탐침의 경우 개구부의 크기를 30nm 이하로는 제작하지 않는다.

2.3.2 변형된 근접장주사현미경 팁

위에서 말한 것과 같은 개구부 탐침의 문제로 인하여, 개구부를 필요로 하지 않는 탐침 제작에 관심을 기울이게 되었고, 그 결과 apertureless NSOM 이 개발되었으며, 현재 많이 사용되기 시작하는 추세이다. 하지만 배경잡음을 줄여야 하는 단점이 있어서 기존의 개구부형 탐침에 약간의 변형을 가함으로써 광 투과율을 높이려는 시도가 있었다.

기존의 근접장주사현미경에서 많이 사용하던 광섬유 탐침에 있어서는 taper angle 의 조절 및 단계 taper 를 구현한 광섬유 탐침의 광 투과율 향상에 초점을 두어 개발이 이루어지고 있다. 이것은 기존의 레이저 빔으로 국부적 가열을 하면서 광화이버를 당겨서 만드는 방식과 달리 Figure 3 에서 보는 바와 같이 화학적 에칭을 통하여 집광부까지 각도를 크게 주는 방식으로 레이저 빔의 손실을 적게 하여 개구부로 빔을 전달하는 방식을 사용하였다.

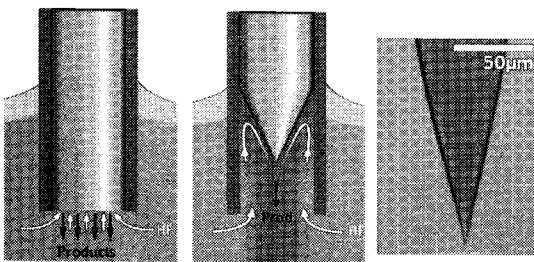


Fig. 3 Chemically etched NSOM fiber tip for the high transmission of laser beam

이와는 별도로 원형 이외의 ‘C’-모양¹¹, 혹은 ‘I(dumbbell)’-모양¹²의 개구부에 대한 투과율 계산과 측정 및 최적화에 대한 연구가 이루어지고 있다. ‘C’-모양 개구부는 하드디스크의 슬라이딩 헤드와 같은 곳에 ‘C’-모양 개구부를 형성하고 그 위에 far-field 의 광원을 쬐어줌으로써 빔 크기를 줄임과 동시에 빔의 강도를 증가시키는 방법이다. 이것을 이용하여 비 접촉식 데이터 저장장치를 위한 헤드로 연구 중이다. ‘I(dumbbell)’-모양 개구부는 개구부의 가장자리에 형성된 기울기에 의한 장증강(field enhancement)를 계산하여 최적화된 모양

을 설계하는 쪽으로 연구가 추진 중이다.

개구부의 크기를 변형시키기 위한 새로운 모양으로 Figure 4 와 같은 bow-tie 안테나 형¹³ 나노스케일 개구부의 투과율 및 장 집중(field confinement)에 대해서도 실험과 시뮬레이션이 병행되고 있다.

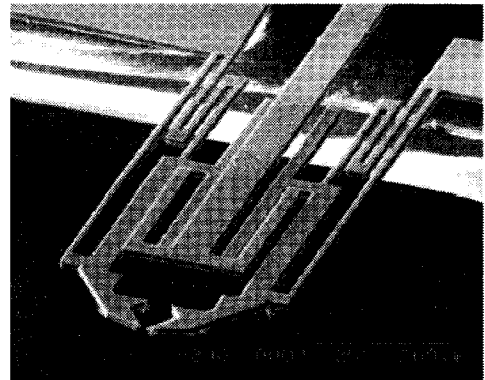


Fig. 4 Bow-tie antenna probe for near-field optical imaging

이상적인 Bow-tie 안테나를 제작하기 위해서는 두 금속 탐침 사이의 간격이 10nm 정도로 가까워져야 하는데, 실제로 반도체 제조 공정을 이용하여 이정도 크기의 간격을 만들어내는 것은 불가능하지는 않지만 수율이 낮다. 따라서 MEMS 공정으로 만들어진 electrostatic actuator 위에 두개의 탐침을 제작하고, 전압을 변화시킴으로써 두 탐침 사이의 간격을 조절할 수 있도록 하였다. 결과적으로 solid immersion 렌즈의 제작을 통한 광원의 크기 축소 연구 보다는 planar aperture 의 모양을 다양하게 변형함으로써 투과율 및 광원의 미세화 쪽으로 방향을 잡고 있다.

2.4 Apertureless NSOM

2000 년대 초반 전후로 하여 개구부 형이 아닌, Figure 5 와 같이 산란(scattering) 형태의 apertureless 탐침에 대한 연구가 이루어졌으며, 현재 대부분의 연구자들의 30nm 이하의 해상도를 갖는 광학 이미징 획득을 위하여 apertureless 형 근접장 광학 현미경 장치를 개발하여 연구에 이용하는 추세이다. 이러한 형태의 apertureless 탐침은 기존의 원자 현미경에서 탐침으로 이용하던 실리콘 캔틸레버에 금속 박막을 코팅하여 만들 수 있으므로, 기존의 원자 현미경에 far-field 광원을 추가함으로써 곧바로 구현이 가능하다는 장점이 있으며, 실제로 시료에 조사되어 물질과 상호작용하는 빛의 세기를

증가시킬 수 있으며, 이로 인해 신호대잡음비를 높일 수 있다는 이점이 있다.

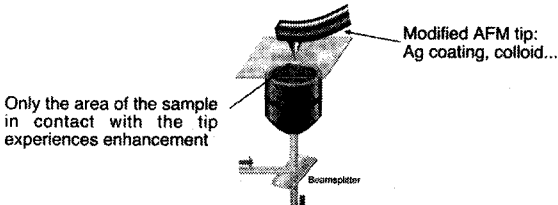


Fig. 5 Schematics of apertureless-NSOM

현재 이용되는 근접장주사현미경의 전술한 바와 같이 두가지로 나뉜다. 전통적인 방식의 개구부 형 근접장주사현미경은 광 투과율이 제한요소이다. 개구부의 크기가 줄어들면 해상도는 키울 수 있으나, 출력 광의 세기가 줄어들어 신호대잡음비를 줄이는 요인이며 대략 70nm 해상도까지 한계인 것으로 보인다¹⁴. 한편, apertureless 근접장주사현미경의 경우에는 해상도를 더 키울 수 있어서 수 나노미터까지 줄일 수 있지만, 배경잡음이 근접장 신호보다 더 커져서 배경잡음을 원하는 수준까지 줄여야 하는 문제가 있다. 탐침은 회절한계의 초점에 놓이게 되고, 조사된 빛의 일부분만 탐침과 커플링되며, 대부분의 빛은 배경잡음에 기여하게 된다. 따라서 관찰하고자 하는 단일분자들이 클러스터로 되어 있다면, 단일 분자로부터 나오는 신호를 분리하는 것은 불가능하다.

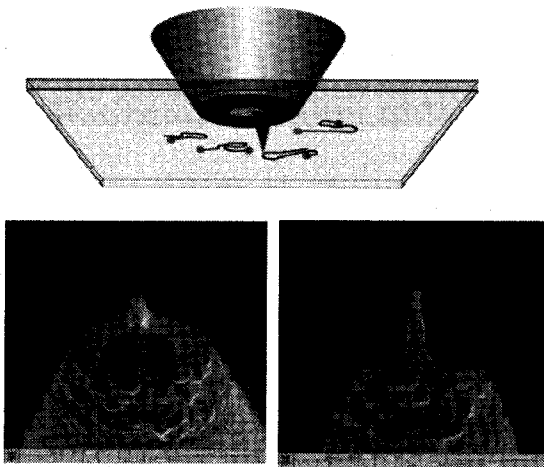


Fig. 6 'Tip-on-aperture' NSOM tip

Apertureless NSOM 을 이용하여 장증강과 선명도 향상 및 신호대잡음비를 높이는 방법이 계속 연구

되고 있다. 특히, apertureless NSOM 방식에 헤테로 다인 간섭계를 결합하여 연구하는 방식은 해상도를 증가시키는 대안으로 제시되고 있다.

최근 Figure 6 에서 보이는 것과 같이 개구부가 형성된 광섬유 탐침 끝단에 미세한 tip 을 만들어 aperture NSOM 과 apertureless NSOM 의 장점을 결합하려는 시도가 이루어지고 있다¹⁵. 레이저 빔이 개구부의 끝단에 도달하면 개구부 끝단에 돌출된 팁을 따라 계속 진행하게 되고 이것이 결과적으로 팁의 크기에 비례한 미세한 광원이 형성되는 것을 FDTD 해석을 한 결과¹⁶ Figure 7 에서와 같이 확인할 수 있다.

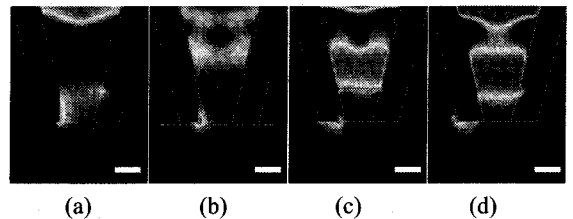


Fig. 7 Electric field intensity distribution of tip-on-aperture probe (a) $\Delta t = 0$ (b) $\Delta t = 125.8as$ (c) $\Delta t = 251.6as$ (d) $\Delta t = 337.4as$, scale bar = 100nm

3. 나노패터닝

나노 표면 변형, 나노 리소그래피 혹은 나노 조작은 주로 원자간력현미경(AFM)이나 주사터널링현미경(STM)을 이용한 연구에서 많이 다루어져 왔으며 광학적 원리에 의한 방식으로는 근접장 광 리소그래피, 광학 트위저에 의한 분자 혹은 나노 입자 조작 등이 있으며, 원자간력현미경이나 주사터널링현미경에 비해서 비접촉식 방식을 유지할 수 있으나 비접촉식이란 점 때문에 원자간력현미경이나 주사터널링현미경에 비해서 활발한 연구가 이루어지지 않았다.

근접장광학현미경을 이용한 패터닝 제작 방법은 Figure 8 과 같이 기존의 포토리소그래피 방법에서부터 근접장에 의해 국부적으로 달라지는 대상 물질의 물리적 특성에 따라서 자기광학과 같은 물질의 상(phase)을 변화시키는 방법, 화학적 결합이 끊어지거나 새로운 결합이 만들어지도록 유도하여 지형을 변화시키는 방법, 발광특성, 굴절률 등과 같은 광학적 성질을 변화시키는 방법, 마지막으로 빛이 조사된 부분의 용해성을 변화시키는 방법 등 여러가지 방법이 제안되었다. 물질의 광학적 성질

을 변화시키는 방법은 특정 파장대의 빛을 받으면 그 부분의 발광특성이 달라지는 dye-doped polymer¹⁷⁻¹⁹ 나 굴절율이 달라지는 성질을 이용하여²⁰ 광 스위치나 광 저장장치에 응용하려는 연구가 진행되었다. 이러한 공정은 다른 공정보다는 패턴의 크기가 1μm 정도 수준으로 큰 편이지만, 표면의 높이 변화는 없이 광학적 성질만을 변화시킬 수 있다는 점과 사용하는 광원에 따라서 표면의 성질을 변화시킬 수도 있고 변화는 일으키지 않으며 측정만을 할 수도 있다는 점에서 다른 공정과 차별성이 있다.

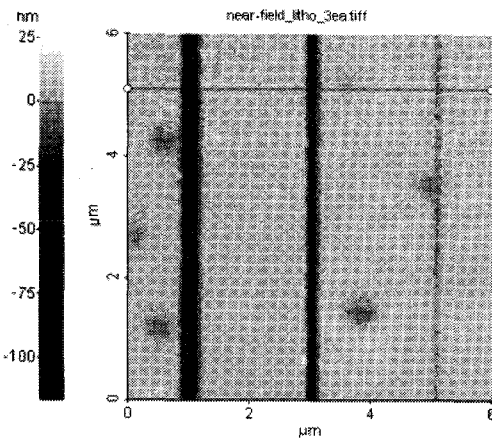
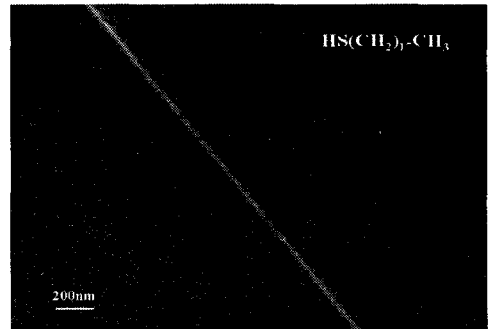


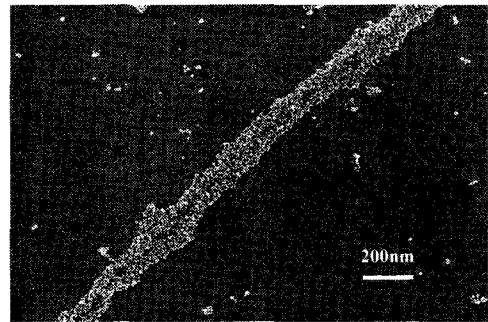
Fig. 8 NSOM lithography of nanoscale lines on photoresist with varying laser beam intensity

시료 표면에 박막을 생성하고 생성된 박막의 용해성을 변화시켜서 패턴을 만드는 공정²¹⁻²³은 전통적인 포토 리소그래피와 원리가 같다. 이러한 공정은 기판에 패턴을 전사할 수 있다는 장점이 있다. 기판에 패턴을 나노크기의 패턴으로 전사하기 위해서는 가급적 박막을 얇게 생성해야 하는데 최근에는 자기조립박막(Self-Assembled Monolayers; SAMs)을 사용하여 단분자 수준으로 얇은 박막을 만들어 패턴을 전사할 수 있는 기술이 개발되었다. Sun 등은 자기조립박막위에 패턴을 만들어 다른 분자로 치환을 하거나 패턴이 만들어진 부분의 단분자막만을 제거하여 패턴을 기판에 전사시키는 방법을 이용하여 50nm 수준의 선 패턴을 제작하였다. Sun 등의 연구에서는 파장이 244nm 인 레이저를 이용하여 패턴을 만든 후에 다른 분자로 치환하는 이중분자패턴을 제작하기도 하였다. 최근

기계연구원에서는 Figure 9 에서와 같이 Deep UV 레이저를 사용하지 않고 펄초레이저를 이용하여 패턴을 형성하고 이중분자패턴을 이용하여 금 나노 입자를 자기조립함으로써 동일한 현상이 일어나는 것을 확인하였다.



(a) Ferri-ferrocyanide etching



(b) Self-assembly of gold nano particle

Fig. 9 SEM micrographs of (a) the patterned substrates with etchant and (b) nano particles self-assembled with hexanedithiol

이와 같이 근접장 광학현미경을 이용한 패턴 제작 기술은 SPM 리소그래피의 모든 장점을 그대로 유지하면서 다양한 물질과 응용분야에 적용할 수 있는 기술이라는 점에서 다른 SPM 리소그래피와 차별성을 갖는다.

4. 결론

최근의 근접장주사현미경은 기존의 원자간력 현미경(AFM)을 기초로 하여 근접장 광을 만들어 낼 수 있는 근접장 광원과 이를 검출할 수 있는 검출기를 추가 장착하여 상업용으로 제작되고 있

다. 광섬유 탐침 혹은 캔틸레버 탐침을 바탕으로 aperture-NSOM 혹은 apertureless-NSOM 의 형태로 발전되고 있으며, 이를 바탕으로 물리, 생물, 화학, 재료학 등의 분야에서 실험도구로 사용되고 있다. 하지만, 아직까지는 원자간력현미경만큼 널리 사용되는 도구는 아니다.

단순히 광학적 반사/투과 특성만 측정하는 것이 아니라, 분광정보까지 측정함으로써 단일분자 수준에서 분자의 화학적인 정보를 얻어내어 분자 수준의 구별이 가능해졌고, 좀 더 풍부한 광학정보를 나노미터 크기에서 얻을 수 있어서 나노광학에 필수적인 도구로 자리 잡을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원 (M102KN010001-02K1401-00710)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hecht, E., "Optics 3rd ed. Addison Wesley," p.464, 1998.
2. Syngge, E. H., "A Suggested Method for Extending Microscopic Resolution into the Ultra-Microscopic Region," The London, Edinburgh and Dublin Phil. Mag. & J. Science, Vol. 6, pp. 356-352, 1928.
3. Bethe, H. A., "Theory of Diffraction by Small Holes," Phys. Rev. Vol. 66, No. 7, pp. 163-182, 1944.
4. Bowkamp, C. J., "On Bethe's Theory of Diffraction by Small Holes," Phils. Res. Rep., Vol. 5, No. 5, pp. 321-332, 1950.
5. Ohtsu, M., "Near-field Nano/Atom Optics and Technology," Springer-Verlag, 1998.
6. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch. and Weibel, E., "Scanning Tunneling Microscopy," Phys. Rev. Lett., Vol. 49, pp. 726-735, 1982.
7. Binnig, G. and Quate, C. F., "Atomic Force Microscope," Rhys. Rev. Lett., Vol. 56, pp. 930-933, 1986.
8. Betzig, E., Grubb, S. G., Chichester, R. J., DiGiovanni, D. J. and Weiner, J. S., "Fiber Laser probe for Near-field Scanning Optical Microscopy," Appl. Phys. Lett., Vol. 63, No. 26, pp. 3550-3552., 1993.
9. Pohl, D. W. and Novotny, L., "Near-field Optics: Light for the World of Nano," J. Vac. Sci. & Tech., Vol. 12, No. 3, pp. 1441-1446, 1994.
10. Cline, J. A. and Isaacson, M., "Comparison of Different Modes of Reflection in Near-field Optical Imaging," Ultramicroscopy, Vol. 57, pp. 147-152, 1995.
11. Shi, X. and Hesselink, L., "Design of a C Aperture to Achieve $\lambda/10$ Resolution and Resonant Transmission," J. Opt. Soc. America, Vol. 21, No. 7, pp. 1305-1317, 2004.
12. Tanaka, K. and Tanaka, M., "Optimized Computer-Aided Design of I-Shaped Subwavelength Aperture for High Intensity and Small Spot Size," Opt. Comm., Vol. 233, pp. 231-244, 2004.
13. Ono, T., Iwami, K. and Esashi, M., "Micromachined Optical Near-field Bow-Tie Antenna Probe with Integrated Electrostatic Actuator," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 14, pp. L445 - L448, 2005.
14. Veerman, J. A., Otter, A. M., Kuipers, L. and van Hulst, N. F., "High Definition Aperture Probes for Near-field Optical Microscopy Fabricated by Focused Ion Beam Milling," Appl. Phys. Lett., Vol. 72, pp. 3115-3119, 1998.
15. Frey, H. G., Witt, S., Felderer, K. and Guckenberger, R., "Enhancing the Resolution of Scanning Near-field Optical Microscopy by a Metal Tip Grown on an Aperture Probe," Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 26, pp. 5030-5032, 2002.
16. Kim, J. B., Na, S. J. and Chang, W. S., "A Study on Electro-Magnetic Energy Distribution of Modified Probe for NSOM-lithography," 8th Int. Conf. On Laser Ablation, Banff, Canada, p. 370, 2005.
17. Riehn, R. Charas, A., Morgada, J. and Cacialli, F., "Near-field Optical Lithography of a Conjugated Polymer," Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No.4, pp. 526-528, 2003.
18. Aoki, H. and Ito, S., "Near-field Photo-Patterning of Ultra-Thin Polymer Films," Thin Solid Films, Vol. 449, pp. 226-230, 2004.
19. Kwon, S., Chang, W. and Jeong, S., "Shape and Size

- Variations During Nanopatterning of Photoresist Using Near-field Scanning Optical Microscope,” *Ultramicroscopy*, Vol. 105, pp. 316-323, 2005.
20. Takahashi, S., Samata, K., Muta, H., Machida, S. and Horie, K., “Refractive-index Patterning Using Near-field Scanning Optical Microscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 1, pp. 13-15, 2001.
21. Cacialli, F., Riehn, R., Downes, A., Latini, G., Charas, A. and Morgado, J., “Fabrication of Conjugated Polymers Nanostructures Via Direct Near-field Optical Lithography,” *Ultramicroscopy*, Vol. 100, pp.449-455, 2004.
22. Sun, S. and Leggett, G. J., “Generation of Nanostructures by Scanning Near-field Photolithography of Self-Assembled Monolayers and Wet Chemical Etching,” *Nano Letters*, Vol. 2, No. 11, pp. 1223-1227, 2002.
23. Choi, M., Chang, W., Kim, J., Cho, S. and Whang, K., “Micromachining Thin Film Using Femtosecond Laser Photo Patterning of Organic Self-Assembled Monolayers,” *J. Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 12, pp. 160-166, 2004.