

공초점 레이저 현미경의 구성과 응용

글 : 이승걸 · 염경춘/인하대학교 전자재료공학과 광전자 연구실

물체의 표면 형상을 관찰하기 위해 공초점 레이저 현미경을 구성하였으며 구성된 공초점 레이저 현미경의 분해능을 실험적으로 측정하여 이론치와 비교했다. 또한 현미경의 구성 요소 중에서 현미경 대물렌즈의 배율이나 수치 구경(numerical aperture), 사용된 핀 홀의 크기 등이 분해능에 어떤 영향을 미치는가를 실험적으로 조사했다. 마지막으로 구성된 공초점 레이저 현미경을 물체의 표면 형상 관찰에 적용하여 그 가능성을 확인했다.

1. 서 론

물체의 표면을 관찰하는 장치는 측정방식에 따라 접촉식과 비접촉식, 결상(imaging)방식과 scanning방식, 간섭법과 비간섭법 등으로 구분되며, 구체적인 예로는 scanning probe microscope, optical focus sensor, interferometric optical profiler, SEM, atomic force microscope, 공초점 현미경(confocal microscope) 등이 있다.

이 중에서 공초점 현미경은

1961년에 Minsky에 의하여 처음으로 제안되었으며 그 후 여러 연구자들에 의하여 개발되어 왔다. 공초점 현미경은 기존의 광학 현미경과 달리 depth discrimination이 가능하므로 물체의 3차원 형상을 확대 관찰할 수 있으며, 일반 현미경에 비해 횡방향 분해능(lateral resolution)이 1.4 배 정도 좋다는 장점도 있다. 이러한 장점 때문에 공초점 현미경은 생물학이나 의학, 생화학 분야에서 세포의 관찰에 널리 응용되고 있다. 최근 들어 표면 형상의 관찰이나 반도체 웨이퍼 조사에 공초점 현미경을 응용하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 선진 외국에서는 이 분야에 대한 연구가 이미 오래 전부터 진행되어 이에 관한 기술 축적이 크지만, 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구가 거의 없었으므로 이 분야에 대한 연구가 꼭 필요한 실정이다.

본 연구에서는 표면 형상에 응용하기 위해 레이저를 광원으로 하는 공초점 현미경, 즉 공초점 레이저 현미경(confocal scanning laser microscope)을 구성하였으며, axial

response를 측정하여 시스템의 분해능을 결정했다. 또한 간단한 시료에 대한 표면형상을 측정하여 공초점 레이저 현미경의 응용 가능성을 확인하였다.

II. 원리 및 이론

1. 공초점 레이저 현미경의 동작 원리

공초점 레이저 현미경의 기본 원리는 그림 1과 같다. 광원(레이저)으로부터 방출된 빛은 광원쪽에 놓인 핀 홀 P1을 지나 광속 분리기 (beam splitter) BS에 의해 반사된 후, 현미경 대물렌즈에 의해 집속점 S1(P1의 상점)에 집속된다. 만일 집속점 위치에 평면 거울과 같은 반사형 시료가 놓여 있다면, 시료면으로부터 산란된 반사광은 P1으로 되돌아가거나 BS를 투과해 점 검출기(point detector) P2 쪽으로 진행하게 된다. 이때 P2를 광원으로부터 집속점까지의 거리와 같은 위치에 설치한다면(이와 같이 P1과 P2가 현미경 대물렌즈의 집속점을 공유하는 것을 공초점이라고 함), 시료

로부터 산란된 광은 P2에 집속되어 검출기에 의해 검출될 것이다. 그러나 시료가 집속점이 아닌 다른 위치(예를 들어 그림 1의 S2)에 놓이게 되면, 그림의 점선과 같이 산란된 반사광은 P2의 앞쪽에 집속되므로 P2에 의해 검출되는 반사광의 세기는 급격히 감소될 것이다. 시료가 집속점에 놓인 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 P2에 의해 검출되는 신호는 크게 달라지므로 검출된 신호변화를 통해 반사면의 위치를 식별할 수가 있게 된다. 예를 들어 시료를 광축방향(z 축)으로 이동시키면서 P2에 의해 검출되는 반사광의 세기 변화를 조사한다면, 현미경 대물렌즈의 집속점으로부터 시료표면(반사면)이 얼마나 떨어져 있었는가를 판단할 수 있게 된다. 이것이 두께를 가진 반사형 시료에 대하여 높낮이를 알아낼 수 있는

depth discrimination의 원리가 된다. 또한 투명한 시료의 경우는 (그림 1)과 같은 정렬 상태에서 집속점 근방에서 산란된 반사광만이 검출되기 때문에, 시료를 광축 방향에 수직인 방향으로 조각조각 잘라서 관찰할 수 있게 되는데, 이를 optical sectioning이라 한다. 또한 같은 원리에 의해 공초점 레이저 현미경의 횡방향 분해능이 일반 현미경에 비하여 약 1.4배 정도 좋아지는 것도 설명될 수 있다.

이와 같은 원리를 이용하여, 시료를 횡방향과 종방향으로 이동시키면서 각 점으로부터 산란된 반사광의 세기를 검출하고 검출된 신호를 컴퓨터로 분석함으로써 물체의 3차원 형상 혹은 표면 형상을 관찰할 수 있게 된다. 한편, (그림 1)의 점 검출기는 이상적인 것으로 실제 실험에서는 유한 구경의

핀 홀을 가진 검출기가 사용된다. 이 경우 핀 홀의 크기에 따라 분해능이 변하게 되는데 다음절에서 이에 대해 다룰 것이다.

2. 공초점 레이저 현미경의 분해능

본 절에서는 공초점 레이저 현미경의 분해능에 관련된 이론 결과를 소개하고 이를 통해 현미경 대물렌즈의 배율이나 수치 구경(numerical aperture), 사용된 핀 홀의 구경이 분해능에 어떤 영향을 미치는가를 설명하고자 한다.

반경이 r_p 인 동일한 핀 홀을 (그림 1)의 P1과 P2로 사용하여 이상적인 반사면을 관찰하는 경우, 물체(반사면)의 z축 위치에 따른 검출광의 세기는 아래와 같은 관계식으로 주어진다.

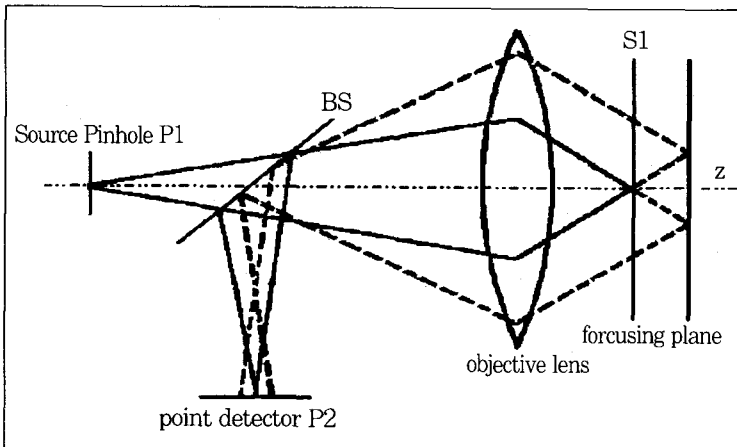
$$I_{plane}(u) = \int_0^\infty |h(2u, v)|^2 D(v) v dv, \quad (1)$$

여기서 h , $D(v)$ 는 대물렌즈의 점퍼짐 함수(point-spread function)와 검출기의 민감도(sensitivity)로서

$$h(u, v) = \int_0^1 P(\rho) \exp(ju\rho^2/2) J_0(v\rho) \rho d\rho,$$

$$D(v) = \begin{cases} 1 & v \leq v_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

와 같다. 이 관계식에서 $P(\rho)$



(그림 1) 공초점 현미경의 원리도

는 pupil 함수이며 $J_0(v_p)$ 는 0 차 Bessel 함수이다. 규격화된 좌표 u, v 와 규격화된 편 흘 반경 v_p 는

$$u = \frac{8\pi}{\lambda} \sin^2 \frac{\alpha}{2} z, v = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha \lambda \quad (2)$$

$$v_p = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\sin \alpha}{M} r_p \quad (3)$$

로 주어진다. r 과 z 는 각각 물체면에서 중심 축으로부터의 거리와 집속점으로부터의 종축 거리이며, λ 는 입사광의 파장, M 과 $\sin \alpha$ 는 현미경 대물렌즈의 배율과 수치 구경이다. 편 흘의 반경이 영인 경우 즉, 이상적인 점 검출기를 사용하는 경우 식(1)은 아래와 같이 정돈될 수 있다.

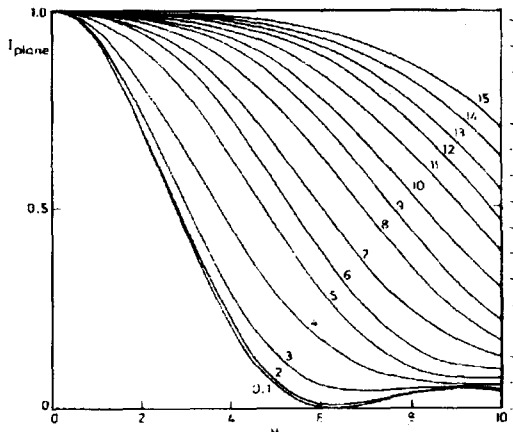
$$I_{plane}(u) = \left| \frac{\sin(u/2)}{u/2} \right|^2$$

식(1)을 이용하여 반사면의 위치에 따른 검출광의 세기 변화 즉, $I(u)$ 를 계산할 수 있다. 각 v_p 값에 대한 계산 결과는 (그림 2)와 같으며 이를 axial response라 한다. u 값에 따라 axial response 곡선이 점차 감소함을 볼 수 있는데 이러한 성질을 이용하여 물체의 표면 형상이나 3차원 형상을 관찰할 수 있다.

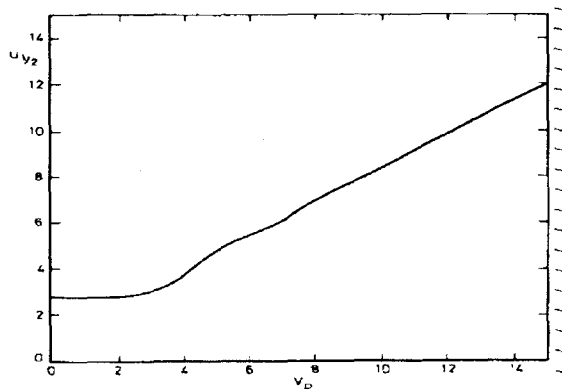
공초점 레이저 현미경으로

반사면 위치를 측정하기 위해서는 반사면을 z 축을 따라 이동시키면서 검출광의 세기 변화를 검출하게 된다. 이때 반사면의 이동에 따라 검출광 세기가 급격히 변화한다면, 즉 axial response 곡선이 급격히 감소하는 특성을 보인다면, 반사면 위치를 정밀하게 정의할 수 있지만, 그 반대의 경우는 반사면 위치를 정확하게 정의할 수 없을 것이다.

그러므로 공초점 레이저 현미경의 구성 조건에 따른 axial response 곡선의 반치폭은 공초점 레이저 현미경의 종방향 분해능을 결정하는 주요한 요소가 된다. (그림 2)에서 v_p 가 증가함에 따라 axial response 곡선이 점차 완만하게 감소함을 볼 수 있는데, 이는 현미경 대물렌즈의 배율과 수치구경 (NA), 편 흘의 크기에 관계된 v_p 값이 커질수록 종방향 분해



(그림 2) 주어진 v_p 에 대한 u 와 $I(u)$ 의 관계



(그림 3) v_p 에 따른 $I(u)$ 의 반치폭 변화

능이 저하된다는 것을 의미한다.

(그림 2)로부터 v_p 값에 따른 반치폭 변화를 (그림 3)에 나타내었는데, v_p 가 2.5 보다 작은 경우에는 반치폭이 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 즉, v_p 의 값이 어느 정도 이하로 유지한다면, 점 검출기를 사용하지 않더라도 공초점 레이저 현미경이 최고 분해능을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 참고로 일반적인 공초점 레이저 현미경에서 검출기 앞단의 핀 홀 크기는 종방향 분해능보다는 횡방향 분해능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

한 예로서 본 연구에서 사용된 검출기 앞단의 핀 홀(반경 $12.5\mu\text{m}$)과 현미경 대물렌즈(20X)에 대해 v_p 값을 구해보면 4.96이 된다. 이 값을 (그림 3)에 적용하여 반치폭을 구해보면 4.9가 된다. 이 값을 실제 z 좌표 값으로 환산하면 공초점 레이저 현미경의 반치폭이 약 $3.68\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

III. 장치의 구성

1. 공초점 레이저 현미경의 동작 방식

공초점 레이저 현미경은 검출되는 산란광의 종류와 주사(scan) 방식에 따라 여러 가지로 구분된다. 일반 광학 현미경의 경우 결상과정을 통해 시료

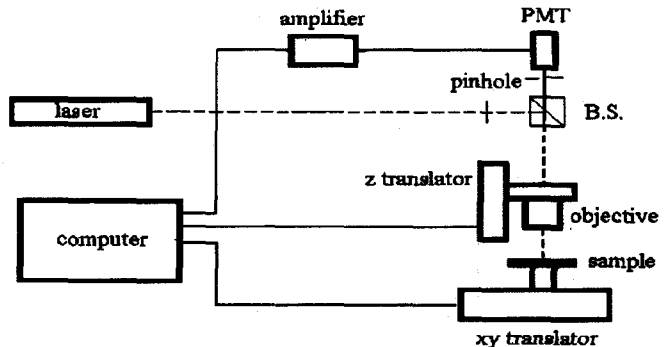
의 확대된 상을 얻게 되지만, 공초점 레이저 현미경에서는 시료의 각 부분으로부터 산란된 광을 검출하기 위해 주사광정이 반드시 필요하다. 주사하는 방식에 따라 시료 고정대를 주사하는(scanned stage) 방식, 입사광을 주사하는(scanned beam) 방식, 현미경 대물렌즈를 주사하여 집속점을 이동시키는(scanned objective) 방식으로 구분된다. 또한 검출광의 종류에 따라 시료로부터 산란되는 반사광을 검출하는 reflection mode, 투과광을 검출하는 transmission mode, 그리고 형상을 검출하는 fluorescent mode로 구분된다.

본 연구에서는 공초점 레이저 현미경을 이용하여 반도체 웨이퍼나 물체표면을 관찰하고자 하므로, 물체로부터 산란된 반사광을 검출하는 reflection mode를 선택하였다. 그리고 시료를 주사하는 방식으로는

시료 고정대를 주사하는 방식을 채택하였다. 입사광을 주사하거나 현미경 대물렌즈를 이동하는 방식은 단시간 내에 비교적 좁은 영역을 관찰할 수 있다는 장점이 있지만, 넓은 영역을 관찰하고 현미경 대물렌즈의 서로 다른 영역으로 빛이 통과함으로 인해 발생하는 여러 가지 수차들로 인한 분해능의 저하를 막기 위하여 시료 고정대를 주사하는 방식을 채택하였다.

2. 공초점 레이저 현미경의 구성

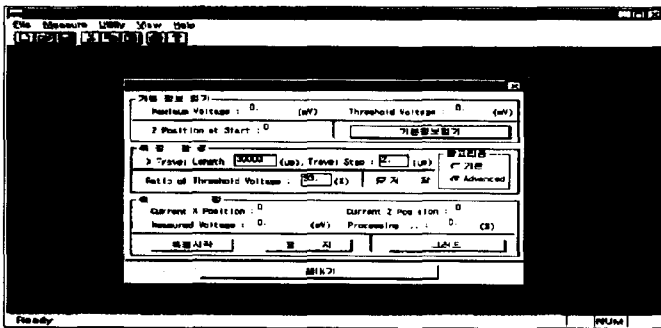
reflection mode와 scanned stage 방식을 채택한 공초점 레이저 현미경의 구성도는 (그림 4)와 같다. 광원으로는 파장 632.8nm 의 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 시료 고정대를 x, y축 방향으로 이동시키는 두가지 translation stage와 현미경 대물렌즈를 z축 방향으로 이동시키는 translation stage가 사용되었다.



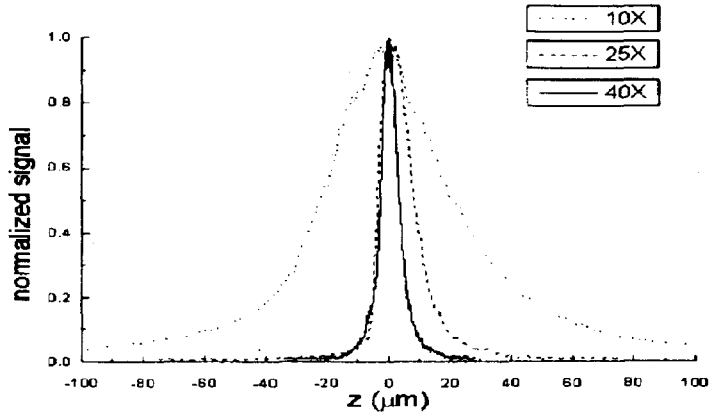
(그림 4) 공초점 레이저 현미경의 개략적인 구성도

translation stage들의 최소 이동거리는 $0.1 \mu\text{m}$ 이며 전체 이동거리는 약 10 cm 이다. 또한 시료로부터 산란되는 반사광을 검출하기 위하여 photomultiplier tube를 사용하였으며, 실험에 사용된 현미경 대물렌즈는 4가지로서 배율과 수치구경은 각각 10X (NA=0.25), 25X(NA=0.5), 40X(NA=0.6)이었다. 광원과 검출기 앞단에 각각 설치되는 핀 홀쌍은 구경이 $25 \mu\text{m}$ 과 $50 \mu\text{m}$ 이다.

시료 고정대와 현미경 대물렌즈를 이동시키는 3개의 translation stage는 각각 컴퓨터로 제어되며, 검출광의 세기는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 저장된 후 표면 형상의 결정이나 3차원 형상의 재현을 위해 자동으로 처리된다. 시료의 관찰에 관련된 일련의 과정은 Windows 환경 하에서 제어 및 처리되는데 이를 위해 작성된 소프트웨어의 구동상태를



(그림 5) 공초점 레이저 현미경을 제어하는 소프트웨어의 일부 화면



(그림 6) 검출기 앞단의 핀 홀 구경이 $50 \mu\text{m}$ 인 경우에 측정된 axial response.

(그림 5)에 나타내었다. 이 그림은 시료의 표면 형상을 측정하는 과정을 보여주고 있다.

IV. 시스템의 성능 평가를 위한 axial response의 측정

axial response를 측정하기 위해 평면 거울을 시료로 사용하였으며, 시료를 z축 방향으로 $0.1 \mu\text{m}$ 씩 이동시키면서, 각 위치에서 검출기에 의하여 검출되어지는 산란광의 세기를

측정하였다. 실험에 사용된 핀 홀쌍의 구경은 $50 \mu\text{m}$ 이었으며, 현미경 대물렌즈의 배율을 10X(NA=0.25), 25X(NA=0.5), 40X(NA=0.65)로 바꾸어 가며 측정하였다.

측정된 결과는 (그림 6)과 같다. 검출기 앞단에 구경 $50 \mu\text{m}$ 인 핀 홀을 위치시켰으며, 현미경 대물렌즈로 배율이 10X (NA=0.25), 25X(NA=0.5), 40X(NA=0.65)인 것을 사용하였다. 그림에서 현미경 대물렌즈의 배율이 높아질수록 반치폭이 감소함을 볼 수 있는데, 이를 통해 이론에서 예측된 것과 같이 배율과 수치구경이 높아질수록 분해능이 향상됨을 알 수 있다. 또한 구경 $25 \mu\text{m}$ 인 핀 홀을 사용한 경우에는 구경 $50 \mu\text{m}$ 의 핀 홀을 사용한 경우에 비해 분해능이 더욱 향상됨을 확인할 수 있었다.

이론식으로부터 계산된 이

론치와 실험치를 비교하여 (표 1)에 정리하였는데 공초점 레이저 현미경의 정렬문제 때문에 실험치가 이론치에 미치지 못함을 볼 수 있다. 또한 이론에 따르면 axial response가 좌우 대칭적인 형태를 가져야 하지만, 배율이 높아질수록 비대칭적인 형태가 얻어졌다. 이는 시스템을 구성하는데 있어서 정렬의 어려움 때문인 것으로 생각된다.

IV. 시료의 표면 형상 측정

Axial response 측정 실험으로부터 핀 홀 구경이 25 μ m, 현미경 대물렌즈의 배율이 25X(NA=0.5)일 때 4.8 μ m의 반치폭을 얻을 수 있었는데, 이

조건을 사용하여 간단한 시료에 대한 표면 형상을 조사하여 공초점 레이저 현미경의 응용 가능성을 확인하고자 했다. 본 연구에서는 시료의 표면을 2차원으로 주사하는 대신 1차원으로 주사하였다. 비록 1차원 주사 과정을 통해 시료의 2차원 표면형상을 결정할 수는 없지만, 공초점 레이저 현미경의 응용 가능성을 확인한다는 입장에서는 별 문제가 되지 않을 것이다.

표면형상을 결정하기 위해 시료면을 x 축 방향으로 이동하면서 각 x 점에 대한 axial response를 측정하였으며 측정된 axial response로부터 검출광 세기가 최대인 위치를 판별하여 시료면의 높이를 결정

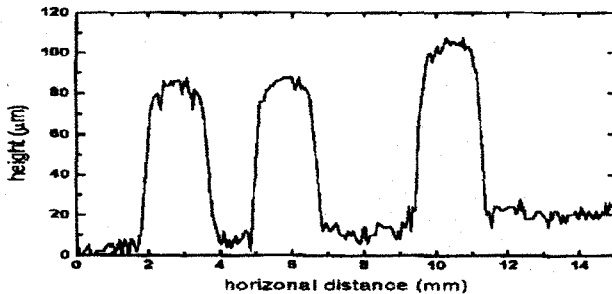
하였다. 이러한 방식으로 시료면의 높이를 결정하기 때문에 높이 측정의 정밀도는 반치폭보다 훨씬 짧은 값이 될 것이며 우리 실험의 경우 정밀도는 대략 1 μ m 정도로 예상된다.

(그림 7)은 10원 짜리 동전의 뒷면을 1차원 주사하여 표면 형상을 측정된 결과이다. 가로축은 x축 좌표로 mm 단위로 표현되었으며 세로축은 측정된 표면의 높이를 μ m 단위로 표현한 것이다.

그림에서 오른쪽이 위로 올라간 것을 볼 수 있는데, 이것은 동전이 시료 고정대 위에 비스듬히 놓여진 때문으로 생각된다. 또한 잡음과 같은 높낮이 변화가 보이는데, 이는 동전 표면의 흠집인 것으로 판단된다. 아직 다른 방법에 의한 측정 결과와 비교해 보지는 않았지만, 이러한 측정 실험은 반도체 웨이퍼 표면 등과 같은 표면 형상 측정에 활용될 수 있을 것이다.

(표 1) 검출기 앞단의 핀 홀 구경이 50 μ m인 경우에 반치폭의 측정치와 이론치의 비교

pinhole size	50(μ m)	
	theoretical value(μ m)	measured value(μ m)
10 X	31.5	41.0
20 X	6.0	12.0
40 X	2.8	5.9



(그림 7) 10원 짜리 동전 뒷면의 표면 형상을 관찰한 결과

V. 결 론

본 연구에서는 공초점 레이저 현미경을 구성하였으며, 종방향 분해능을 결정하기 위해 여러 가지 핀 홀의 구경과, 현미경 대물렌즈의 배율 및 수치구경에 대해 axial response를 측정하였다. 또한 1차원 주사를 통해 반사형 시료의 표면형상을 측정하여 보았다. 측정된

axial response의 반치폭은 구성 조건에 따라 최대 42 μ m에서 4.4 μ m으로 달라지는데, 핀 홀 구경이 50 μ m이고 현미경 대물렌즈의 배율이 10X(NA=0.25)인 경우에 가장 큰 반치폭이 얻어졌으며, 핀 홀 구경이 25 μ m이고 배율이 40X(NA=0.65)인 경우에 최소의 반치폭이 얻어졌다. 이론에서 예측되었던 것과 마찬가지로 핀 홀의 구경이 작을수록 공초점 레이저 현미경의 종방향 분해능

이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 현미경 대물렌즈의 배율과 수치 구경이 높아짐에 따라 서로 같은 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 배율이 높은 경우 측정된 반치폭은 이론치에 비하여 대략 2배 정도까지 차이가 나는데, 이는 공초점 레이저 현미경의 정렬 과정이 배율이 높을수록 어려워지기 때문이다. 앞으로 정렬 방법에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

앞으로의 연구 방향은 반사

형 시료에 대한 표면 형상을 측정하는데 있어서, 주사 시간의 단축과 정확한 측정을 위한 효율적인 알고리즘을 개발하고, 종방향 분해능과 횡방향 분해능을 향상시키기 위한 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 공초점 레이저 현미경을 이용한 표면 형상 측정에서 높이 식별이 정밀도를 정확히 결정하여, 표면 형상 측정의 응용 범위를 명확히 파악하는 연구도 병행되어야 할 것으로 생각한다.

휴식공간

삼성포토갤러리 사진전 일정

구분	일정	전시회명	장소
3월	3. 4 ~ 3. 16	이용환 개인전 "젯빛 하늘, 그늘진 색지"	제1 갤러리
	3. 18 ~ 4. 13	개관기념전-리얼리즘의 현주소	전관
	3. 4 ~ 3. 9	황금심 개인전 "님"	제2 갤러리
	3. 11 ~ 3. 16	이경목 개인전	"
	3. 4 ~ 3. 9	이승환 개인전 "사라져 버리는 것에 대한 나의 기억"	제3 갤러리
	3. 11 ~ 3. 16	이경환 개인전	"
4월	4. 15 ~ 4. 27	신경철 개인전 "The Fragments of Solitude"	제1 갤러리
	4. 29 ~ 5. 11	조세현 개인전	"
	4. 15 ~ 4. 20	안 빅토르 개인전	제2 갤러리
	4. 22 ~ 4. 27	장선희 개인전	"
	4. 29 ~ 5. 4	김대곤 개인전	"
	4. 15 ~ 4. 20	백광현 개인전 "기"	제3 갤러리
	4. 29 ~ 5. 4	전경재 개인전	"