

광섬유 탐침의 반사를 이용한 파면 분석 근접장 주사 공간섭계

유장훈 · 임상엽 · 이현호 · 박승한*

연세대학교 이과대학 물리학과
Ⓣ120-749 서울특별시 서대문구 신촌동 134번지

(2004년 3월 25일 받음, 2004년 5월 6일 수정본 받음)

광섬유 탐침의 끝 단에서 반사하는 광을 이용하는 근접장 주사 공간섭계를 제안하고, 제안한 근접장 주사 공간섭계를 이용하여 초점의 위치와 집광 초점면에서의 파면을 분석하였다. 파면의 분석은 광섬유 탐침의 끝 단에서 반사된 빛과 시료표면에서 반사된 빛을 간섭 시키고, 탐침의 끝 단을 $\lambda/4$ 씩 위상천이 시키면서 4장의 간섭무늬를 얻은 후, 위상천이 알고리즘을 통하여 광학 수차를 구하는 방법을 이용 하였다. 실험 결과 근접 주사시의 초점의 위치를 파장의 3분의 1 이하로 제어할 수 있음을 알 수 있었으며, 제안한 근접장 주사 공간섭계를 이용하여 구한 집광 초점면에서의 파면 수차 값이 트와이만-그린 간섭계를 이용하여 구한 파면 수차 값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

주제어 : near-field scanning optical microscope, wave-front analysis, interferometer, nonlinear optics.

I. 서 론

최근 물질의 구조와 특성을 원자에서 분자 정도의 크기에 이르는 미시적인 수준에서 직접 관찰하고 조절하고자 하는 나노 기술에 관한 학문적 또는 산업적인 연구가 큰 주목을 받고 있다. 극미세 세계의 구조와 특성을 규명하고자 하는 이와 같은 나노기술의 발전은 주사 터널링 현미경(scanning tunneling microscopy: STM), 주사 힘 현미경(scanning force microscopy: SFM), 근접장 주사 광학 현미경(Near-field scanning optical microscope: NSOM) 등 주사 탐침 현미경(scanning probe microscope: SPM) 기술의 급속한 발전에 그 근거를 두고 있다. 이 중에서도 특히 시료 표면 부근에 국소적으로 구속되어 있는 근접장 광신호를 표면 근처의 일정한 거리에 위치한 매우 작은 개구(aperture)를 통하여 검출함으로써, 기존 광학계가 갖고 있는 회절 한계 이상의 고분해능을 제공하는 근접장 주사광학 현미경 기술은 미세 구조를 영상화함과 동시에 상세한 분광학적인 정보를 제공할 수 있다는 점에서 21세기 나노기술 분야의 핵심기술 중의 하나로써 자리잡고 있으며, 현재 양자소자 특성평가, 고밀도 저장 기기 개발, 분자 및 생체공학 연구 등 정보기술 및 생명기술 분야에 광범위하게 활발히 응용되고 있다.^[1-3]

최근에는 고분해능의 근접장 탐침을 이용한 자체집광 현상과 같은 비선형 특성 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 비선형 물질을 광기록용 매체시료로 사용하고 기록밀도의 한계를 극복하려는 시도가 있다.^[4,5] 이러한 광기록용 시료의 비선형성을 조사·분석하려면 초점 면에서의 집광되는 광의 수차 특성이 매우 중요한 요소로 작용한다. 또한 비선형 시

료에서의 자체집광 현상은 임계 광량을 넘어설 경우 시료의 구조적인 변화도 동반하기도 하는데,^[6,7] 이러한 구조적인 변화는 집광 되는 광의 강도 뿐 아니라, 입사되는 광의 구면수차와 코마 등 집광 초점이 갖게 되는 파면의 성질에 의존한다. 따라서, 광학적 파면 분석은 광소자 응용에 있어서 매우 중요한 과정으로 인식되고 있다.

초점 면에서의 파면측정 과정에서 시료가 초점에서 벗어나는 경우에는 왜곡되거나 실제와는 상이한 정보를 얻게 되기 때문에, 시료 표면과 집광 초점 면의 상대적인 위치를 반드시 정밀하게 조절하여야 한다. 특히, 개구수가 높은 광학계를 사용하는 경우에는 제어해야 되는 초점의 심도가 μm 이하이므로 매우 정교한 측정이 요구된다. 초점의 상대적인 정밀 위치 제어를 위하여 Z-scan 방법이 주로 사용되고 있으나, Z-scan 방법으로 초점의 위치를 sub-micron 이내로 제어한다는 것은 그리 쉬운 일이 아니다.^[8]

따라서 본 논문에서는 근접장 주사 광학 현미경의 광섬유 탐침 끝에서 반사되는 광을 이용하여, 시료에 집광되는 초점의 공간적인 위치와 광의 파면을 측정할 수 있는 새로운 기능의 근접장 주사 공간섭계를 제안하고 연구한 결과를 제시하고자 한다. 제안한 근접장 주사 공간섭계는 초점면 가까이 위치한 근접장 광섬유 탐침의 끝 단으로부터 반사된 광과 시료에서 반사된 광이 서로 간섭을 일으키는 현상을 이용하였으며, 이 방법을 이용하여 초점의 위치를 측정할 경우 초점의 위치를 파장의 3분의 1 이하로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 탐침의 끝 단을 $\lambda/4$ 씩 위상천이시켜 얻은 간섭무늬들로부터 위상천이 알고리즘을 통하여 구한 집광 초점 면에서의 파면 수차 값이 트와이만-그린 간섭계를 이용하여 측정된 파면 수차 값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

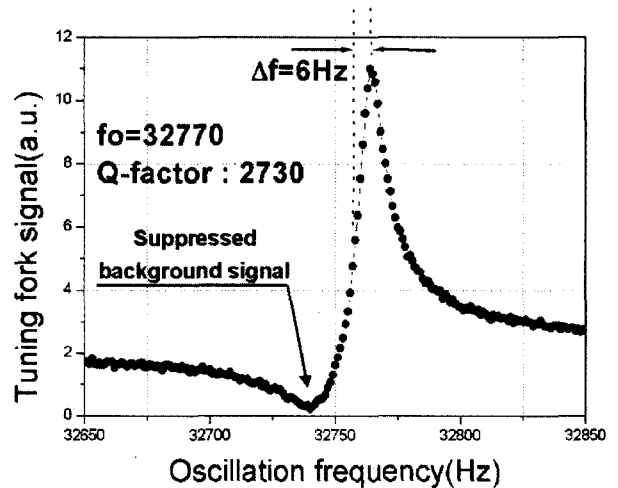
*E-mail: shpark@phya.yonsei.ac.kr

II. 근접장 주사 광간섭계의 구성

제안한 근접장 주사 광간섭계의 개략도는 그림 1과 같다. 근접광을 관측하기 위해서는 사용하는 광의 파장보다 작은 직경의 광섬유 탐침을 이용하고 시료와 탐침 간 거리를 파장보다 짧게 유지시키는 shear-force 검출에 의한 시료-탐침 간 거리 유지가 필수적이다. Shear-force 검출은 수정 진동자(tuning fork)의 공명특성을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다.^[9-12] 거리조절 신호로써 수정 진동자(tuning fork)의 진폭신호를 검출한 후 이미 설정된 기준값과 비교하면 탐침과 시료 사이의 거리를 일정하게 유지시킬 수 있다. 탐침은 주로 광섬유의 끝을 뾰족하게 만들고 100 nm 이하의 opening aperture 주위에 금이나 알루미늄 코팅을 하여 사용한다. 그러나 시료-탐침간 거리가 근접장에 접근한 경우에도 수정 진동자로부터 발생하는 검출신호가 영(zero)이 되지 못하는 문제점이 있다.^[13,14] 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 수정진동자의 주파수 특성을 비대칭적으로 만들어 높은 특이상수 값을 용이하게 얻을 수 있게 하면서, 검출신호가 탐침 접촉 시에 거의 나타나지 않도록 하는 방법을 적용하였다.^[15] Piezoelectric 진동판 위에 수정 진동자를 부착시키고 수정 진동자의 한쪽 다리에 광섬유 탐침을 부착하여 탐침의 끝이 진동하도록 하였다. 그림 2(a)는 수정 진동자에 광섬유 탐침이 부착된 상태의 사진이다. 진동판을 비대칭으로 설계하여 수정 진동자의 진동 모드를 여러 개 발생시키고, 공명특성 곡선이 저주파 영역에서 급격히 증가하는 형태를 선택적으로 사용하였다. 이러한 비대칭적인 공명특성은 특이상수(Q-factor)를 쉽게 높일 수 있다. 특이상수의 정의된 값은 공진주파수를 공명특성 곡선의 반치폭(FWHM)으로 나누어 준 값이다. 근접장 광학 현미경의 탐침이 시료의 표면에 접근함에 따라 수정진동자의 공명주파수는 20 Hz 정도 증가하고, 진폭도 감소하는 것이 알려져 있다.^[10] 따라서 공진주파



(a)



(b)

그림 2. 수정 진동자에 부착된 광섬유 탐침과 비대칭 공명특성.

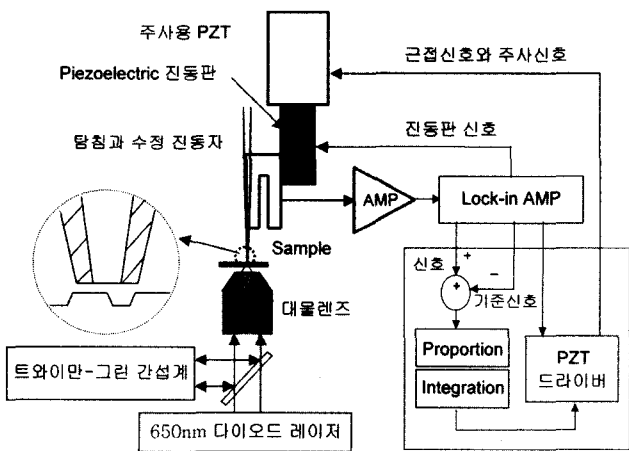


그림 1. 광섬유 탐침으로부터의 반사를 이용한 근접장 주사 광학 간섭계의 구조.

수 부근의 저주파 영역의 주파수특성을 거리조절 신호로 이용하게 되고, 저주파수 영역의 기울기가 급격하면 할수록 거리 조절 신호의 감도가 증가하게 된다. 실제적인 특이상수 값은 그림 2(b)와 같이 저주파영역 만의 반치폭(HWHM)을 2 배하고 이를 특이상수 값으로 고려하였다. 즉, 특이상수는 $Q = F_0 / (2 \Delta f)$ 로 정의할 수 있고 얻어진 값은 2730이었다. 이는 일반적으로 광섬유 탐침이 부착된 수정 진동자에서 얻어지는 특이상수 값($Q=1000$)과 비교하여 상대적으로 높은 값이며, 일반적인 대칭적 공명주파수 특성을 이용하여 구한 결과보다도 우수한 특성이라고 볼 수 있다.^[9] 따라서, 저주파수 영역의 기울기를 가파르게 만들기 위하여 수정진동자(tuning fork)의 공진주파수 특성곡선을 비대칭적으로 만들어 사용하는 경우에 그림 2(b)와 같이 Q-factor값이 큰 신호를 쉽게 얻을 수 있었다. 또한, 탐침이 시료에 근접할 때 잔류하는 기저신호(Background signal)를 그림 2(b)에서와 같이 현저하게 감소시킬 수 있었다. 본 실험에서 사용한 수정 진동자의 공진주파수는 32768 Hz이었다.

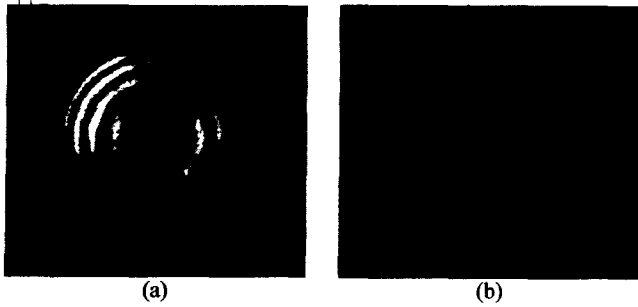


그림 3. 나노 탐침이 근접장으로 접근함에 따라 시료 표면과 탐침으로 반사되어 생성된 간섭무늬: (a) $Z \sim 1 \mu\text{m}$ 인 경우, (b) $Z \sim 10 \text{ nm}$ 에 근접한 경우, 여기서 Z 는 탐침과 시료표면 사이의 거리.

한편, 그림 1에서와 같이 다이오드 레이저로부터 방출된 광이 대물렌즈를 통과한 후 시료 표면에 집광이 되게 하였고, 시료 표면에서 반사한 일부의 광은 대물렌즈를 다시 통과한 후 되돌아 가게 하였다. 이때, 근접장 탐침을 초점 면 근처에 위치시키면 나노 크기의 탐침으로부터 반사된 광이 새로운 광원으로써 역할을 하게 되므로, 탐침끝과 시료 표면으로부터 각각 반사된 광은 서로 간섭되어 그림 3(a)와 같은 동심원의 간섭무늬를 만들게 된다. 이때, 동심원의 중심이 간섭무늬의 중심과 일치하도록 조정하면서 탐침과 초점의 위치를 직선 상에 정렬할 수 있으며, 동심원의 개수는 탐침이 시료의 표면에 근접할수록 줄어들게 된다. 대물렌즈를 통하여 시료에 집광된 광이 초점 이탈이 없는 경우, 탐침이 시료 표면의 근접장까지 접근하였을 때, 그림 3(b)와 같이 하나 이하의 동심원을 만들 수 있었다.

광섬유 탐침의 끝 단은 50 nm 정도의 열린 개구와 그 주위에 200 nm 정도의 두께로 금속 코팅된 구조를 가지고 있어서, 끝 단으로부터 반사된 광이 새로운 점 광원을 만들기 위한 적합한 모양을 가지고 있다. 탐침은 위치의 이동도 자유롭고, 탐침에서 반사된 광과 시료 표면에서 반사된 광을 서로 간섭시킨 상태에서, 탐침의 끝 단을 $\lambda/8$ 씩 이동시키면서 $\lambda/4$ 씩 위상천이 된 4장의 간섭무늬를 측정하고, 측정된 간섭무늬에 위상천이 알고리즘을 적용함으로써 초점에서의 파면수차를 구할 수 있도록 하였다. 이때 광원으로는 650 nm 레이저 다이오드를 사용하였으며, 시료로는 0.6 mm 두께의 광디스크를 사용하였다. 시료의 굴절률은 1.58이었다. 대물렌즈로는 0.7 mm의 두께가 보정된 개구수(N.A.) 0.6인 대물렌즈를 사용하였다. 또한, 제안한 근접장 주사 광간섭계를 이용하여 구한 파면수차의 정확성을 확인하기 위하여, 시료 표면에서 되돌아 온 광의 일부를 광분할기를 통하여 트와이만-그린 간섭계에 입사시켜서, 기준 반사 면에서 반사된 광과 간섭을 일으키게 함으로써 간섭무늬를 만들고, 이 간섭무늬를 분석함으로써 파면수차를 독립적으로 구할 수 있도록 구성하였다.

III. 초점 이탈과 파면 수차 측정 및 분석

위에서 언급한 바와 같이 대물렌즈를 통하여 시료에 집광

된 광이 초점 이탈이 없는 경우에는 탐침 끝을 시료 표면에 근접장까지 접근하였을 때 하나 이하의 동심원만을 만들 수 있기 때문에, 동심원의 간섭무늬가 한 개 이하만 나타나도록 하면, 대물렌즈의 초점이 광디스크의 표면에 정확히 맞히도록 대물렌즈의 위치를 조절할 수 있었다. 탐침과 시료사이의 거리는 10~20 nm 정도로 제어하면서 집광된 광의 중심 경로와 탐침이 일직선 상에 정렬하도록 각별히 주의하였다. 이와 같이 동심원의 간섭무늬가 한 개 이하만 나타나도록 하여 초점의 위치를 정한 후, 대물렌즈와 시료의 위치를 고정된 상태에서, 탐침 끝 단을 파장의 8분의 1만큼씩 시료로부터 멀리 이동시키면서 그림 4의 (a)-(d)와 같은 $\lambda/4$ 씩 위상천이된 4장의 간섭무늬를 얻었다. 근접장($\sim 10 \text{ nm}$)에서 PI control을 수행하면 sub-nanometer 이하의 정밀도를 가지고 거리유지가

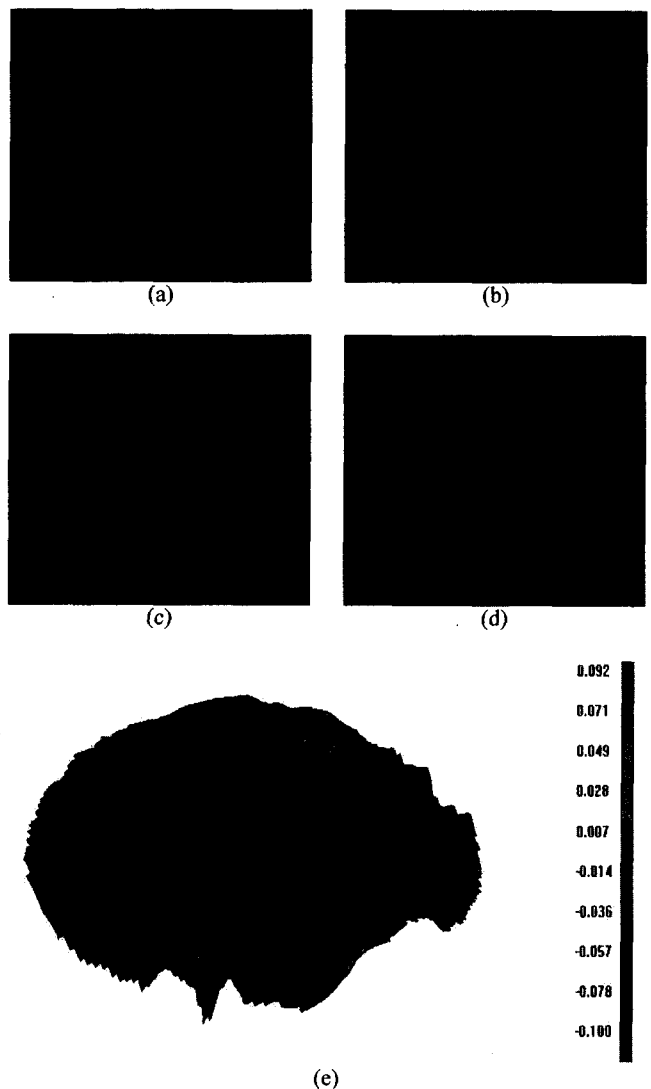


그림 4. 근접장에서 시료 표면과 광섬유 탐침의 끝 단으로부터 반사된 광들이 서로 간섭되어 얻어진 간섭무늬: (a) $Z \sim 10 \text{ nm}$, (b) $Z \sim 90 \text{ nm}$, (c) $Z \sim 170 \text{ nm}$, (d) $Z \sim 250 \text{ nm}$, (e) (a)-(d)의 간섭무늬를 사용하여 계산된 파면, 여기서 Z 는 탐침과 시료 표면 사이의 거리.

표 1. 제한한 근접장 주사 광간섭계를 통한 파면수차의 측정

항목	수차값(λ)	방향(도)	오차(λ)
초점이탈	-0.690		± 0.005
코마	0.026	51.93	
비점수차	0.073	-84.19	
구면수차	-0.222		± 0.005
RMS수차	0.035		
Peak값			

되고, 이때, 기준이 되는 fringe를 측정한 후에, PI control를 정지시킴과 동시에 Z축 거리 조절을 수행하는 주사용 PZT에 인가되는 전압을 조절하여 80 nm 정도의 거리를 이동시킨다. 이는 $\lambda/8$ 되는 값이며 시료 표면과 탐침에서 각각 반사되는 두 개의 반사광 사이에는 $\lambda/4$ 되는 위상차이를 갖게 된다. 거리 이동 후에 CCD를 이용하여 fringe를 다시 측정하고, 반복적인 수행을 통하여 4장의 위상천이된 간섭무늬를 얻을 수 있었다. 여기서 사용된 주사용 PZT는 nanometer이하의 거리조절이 가능한 소자이며 위상천이 과정에서는 ± 10 nm 이하의 정밀도가 요구되지는 않기 때문에, PI control를 적용하지 않는 경우에도 파면의 위상 값을 복원할 수 있었다. 이때 4장의 간섭무늬로부터 위상천이 알고리즘을 이용하여 그림 4(e)와 같은 최적초점에서의 파면을 구할 수 있었으며, 이때 파면 수차의 값은 표 1과 같음을 알 수 있었다. 이때, 파면을 구하기 위하여 탐침의 끝단을 이동시켜야 하는 거리는 250 nm 정도이며, 초점 심도와 비교하여 상대적으로 작은 값이기 때문에 위상천이 과정에서 점 광원으로써의 역할이 충분히 유지되는 것으로 판단된다.

시료에서 반사된 광을 사용한 경우에 대칭적인 수차만이 측정 되고, 코마나 비점수차와 같은 비대칭 수차는 이론적으로 상쇄되어야 하지만, 본 실험에서는 미세하기는 하지만 코마나 비점수차가 존재하였다. 이는 미세한 초점 이탈이 존재하거나, 입사하는 광경로와 되돌아가는 광경로가 서로 정확히 일치하지 않거나, 광이 이미지소자로 진행되는 과정에서 추가적으로 발생하는 비점수차가 검출된 것 등으로 판단된다. 따라서, 근접장 주사 광간섭계로 측정된 이러한 초점이탈의 정도와 파면 수차 측정의 정확성을 살펴보기 위하여 트와이만-그린 간섭계를 이용하여 구한 측정 값들을 비교하여 보았다. 우선 탐침을 시료 표면에서 제거하여 탐침 끝에서 반사되는 광이 없도록 한 후, 시료 표면에서 반사하여 대물렌즈를 통하여 되돌아 온 광의 일부를 광분할기를 통하여 트와이만-그린 간섭계에 입사시켰다. 일반적으로, 트와이만-그린 간섭계를 통한 측정광은 시료 표면에 광이 정확히 집광되고 수차가 없다면 간섭무늬는 곧은 직선이 되지만, 시료가 광의 초점에서 벗어나 있다면 간섭무늬는 동심원을 만들게 된다. 이는 초점이탈 수차가 발생되어 간섭무늬를 휘게 만들기 때문이다. 이때, 광학 수차가 추가로 존재한다면 간섭무늬만을 관측하는 방법으로는 최소의 수차를 만족하는 조건

을 결정하기 쉽지 않으므로, 초점의 위치를 바꾸면서 초점이탈에 따른 간섭무늬와 파면 수차를 측정하였다.

그림 5은 대물렌즈의 위치를 조정하여 (a) 시료 표면에 초점이 미치지 못한 경우와, (b) 최적의 초점에 위치한 경우, 그리고 (c) 초점이 시료 표면을 지나친 경우에 구한 간섭무늬를 보여주고 있다. 이 간섭무늬로부터 구한 그림 5의 (a), (b), (c)에서의 초점이탈 수차(W_{20})는 각각 -0.281λ , -0.694λ , -1.113λ 이었으며, RMS(root mean square)수차 값은 각각 0.040λ , 0.038λ , 0.041λ 이었다. 따라서, 대물렌즈의 위치가 이동하면서 초점이탈 수차가 구면수차와 상호 보정 되어 초점 이탈 수차(W_{20})가 -0.694λ 인 조건에서 최소의 파면 수차(0.038λ)를 보임을 알 수 있다.

이 결과는 본 논문에서 제한한 근접장 주사 광간섭계로부터 측정된 초점이탈 수차 값($W_{20} = -0.690 \lambda$)과 파면 수차 값(0.035λ)이 오차 범위($\pm 0.005 \lambda$)안에서 잘 일치함을 보여 준다. 또한, 파면 수차를 기준으로 하여 반복 측정 하면 초점이탈 수차 값(W_{20})이 $-0.690 \pm 0.050 \lambda$ 이하가 되도록 제어가 가능함을 확인 할 수 있었다. 여기서, $\pm 0.050 \lambda$ 범위의 초점 이탈 수차 값은 위치 공차로는 $\sim 0.2801 \lambda (2W_{20} / NA^2)$ 이하에 해당된다.^[16]

구면 수차의 주된 원인은 대물렌즈가 보정하는 기판의 두께가 0.7 mm인데 비하여 시료의 두께는 0.6 mm인 것에 기인한다고 생각되며, 이러한 구면 수차로 인하여 초점 이탈이 영(Zero)이 아닌 $W_{20} = -0.690 \lambda$ 근방에서 최소의 수차 값을 만족하였다. 이론적인 예측을 위하여 대물렌즈가 보정하는 0.7 mm 두께(D_l)의 기판은 굴절률을 1.50(n_l)이라고 가정할

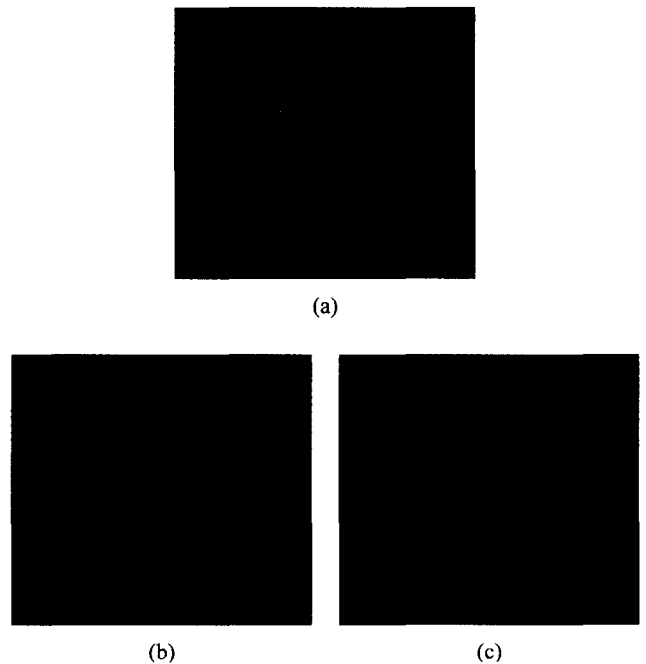


그림 5. 나노 탐침을 제거하고 측정된 간섭무늬 : (a) 시료 표면에 초점이 미치지 못한 경우, (b) 시료 표면에 초점이 집광된 경우, (c) 초점이 시료 표면을 지나쳐서 벗어난 경우.

때, 실험에 사용한 0.6 mm 두께(D_2)의 광디스크의 굴절률은 1.58(n_2)이므로, 이론적인 3차 구면수차가 아래 식 (1) 과 같이 0.790 λ 발생하고 RMS wave-front error(σ)가 아래 식 (2)에서 최소가 되는 조건으로부터 초점이탈 수차도 $W_{20} = -W_{40} = -0.790 \lambda$ 근처의 값을 가질 것으로 예측된다.

$$W_{40} = \frac{1}{8} \left[D_1 \frac{n_1^2 - 1}{n_1^3} - D_2 \frac{n_2^2 - 1}{n_2^3} \right] (NA)^4 \approx 0.790 \lambda \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} (W_{20} + W_{40})^2 + \frac{1}{180} W_{40}^2 \quad (2)$$

실험값($W_{20} = -0.690 \lambda$)과 비교하여 발생한 초점 이탈의 오차($\sim 0.1 \lambda$)는 고차의 구면수차로부터 기인한다.

제안된 근접장 주사 광간섭계를 사용하면 기존의 트와이만-그린 간섭계의 기준 반사경으로부터 발생할 수 있는 시스템 에러를 제거할 수 있고, 여러 번의 반복된 측정을 통하여 얻을 수 있는 최소 수차의 조건을 단 한번의 측정으로 확인할 수 있다는 장점이 있으며, 동심원의 간섭무늬를 관측하면서 매우 정밀한 초점이탈의 조건을 찾음과 동시에, 파면 수차를 구할 수 있다는 장점이 있음을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안한 파면측정이 가능한 근접장 주사 광간섭계를 이용하면 근접장에서 시료에 집광된 최소크기를 갖는 초점의 광분포와 시료의 표면형상을 동시에 측정할 수도 있다. 따라서, 고밀도 광기록계에서 사용되는 기록매체 혹은 Bio-sample을 포함한 나노 크기의 시료 특성 분석, 광초점에서의 공간적인 광세기 분포가 매우 중요한 역할을 하는 자체 집광 현상과 같은 비선형 연구, 광메모리용 디스크의 재생신호의 양호함을 판별하는 수차 및 지터(Jitters) 특성 분석 등에 활용될 수 있으리라 기대된다.^[17]

IV. 결 론

본 논문에서는 이동 가능한 나노 크기의 광섬유 탐침에서 반사하는 광과 시료 표면에서 반사하는 광 사이의 간섭을 이용하는 새로운 기능의 근접장 주사 광 간섭계를 제안하였다. 파장이 650 nm인 다이오드 레이저 광원을 개구수(N.A.)가 0.6 인 대물렌즈를 통과시킨 후 0.6 mm 두께의 광디스크 표면에 집속시킨 후, 제안한 근접장 주사 광간섭계를 이용하여 초점의 위치와 초점에서의 파면을 측정하였다. 측정한 초점의 위치와 초점 면에서의 파면을 트와이만-그린 간섭 방법에 의한 측정값과 비교 분석한 결과, 제안한 근접장 주사 광간섭 방법을 이용할 경우 초점의 위치를 sub-micron이하($< \lambda/3$)로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 탐침의 끝 단을 $\lambda/4$ 씩 위상천이 시킨 후 구한 4장의 간섭무늬에 위상천이 알고리즘을 적용하여 구한 파면 수차가 트와이만-그린 간섭계를 이용하여 구한 파면 수차와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 고밀도 기록계에 사용되는 비선형 물질의 광디스크 분석을 위하여 초점 및 표면형상의 관계뿐만 아니

라 수차와의 상관관계를 예측하는 평가기술로서 효과적으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL:MI-0203-00-0082) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] E. A. Ash, and G. Nicholls, "Super-resolution aperture scanning microscope," *Nature*, vol. 237, pp. 510-512, 1972.
- [2] D. W. Pohl, W. Denk, and M. Lanz, "Optical stethoscopy: image recording with resolution 1/20," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, pp. 651-653, 1984.
- [3] E. Betzig, J. K. Trautmann, T. D. Harris, J. S. Weiner, and R.L. Kostelak, "Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale," *Science*, vol. 251, pp. 1468-1470, 1991.
- [4] W.C. Liu, C.Y. Wen, K.H. Chen, W.C. Lin, and D.P. Tsai, "Near-field images of the AgOx-type super-resolution near-field structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 685-687, 2001.
- [5] L. P. Shi, T. C. Chong, H. B. Yao, P. K. Tan, and X. S. Miao, "Super-resolution near-field optical disk with an additional localized surface plasmon coupling layer," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, pp. 10209-10211, 2002.
- [6] H. Hisakuni, K. Tanaka, "Optical Microfabrication of Chalcolgenide Glasses," *Science*, vol. 270, pp. 974 (1995).
- [7] O. Salminen, N. Nordman, P. Riihola, and A. Ozols, "Holographic recording and photocontraction of amorphous As₂S₃ films by 488.0 nm and 514.5 nm laser light illumination," *Opt. Comm.*, vol. 116, pp. 310-315, 1995.
- [8] K. Song, J. Lee, J. Kim, K. Cho, and S. Kim, "Direct Observation of Self-Focusing with Subdiffraction Limited Resolution Using Near-Field Scanning Optical Microscope," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 3842-3845, 2000.
- [9] K. Karrai, R. D. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, 1842-1844, 1995.
- [10] A. G. T. Ruiters, J. A. Veerman, K. O. van der Werf, and N. F. van Hulst, "Dynamic behavior of tuning fork shear-force feedback," *Appl. Phys. Lett.* vol. 71, pp. 28-30, 1997.
- [11] R. D. Grober, J. Acimovic, J. Schuck, D. Hessman, P. J. Kindlemann, J. Hespanha, and A. S. Morse, K. Karrai, I. Tiemann, and S. Manus, "Fundamental limits to force detection using quartz tuning forks," *Rev. Sci. Instrum.* vol. 71, pp. 2776-2780, 2000.
- [12] W. A. Atia and C. C. Davis, "A phase-locked shear-force microscope for distance regulation in near-field optical

- microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, pp. 405-407, 1997.
- [13] R. S. Decca, H. D. Drew, and K. L. Empson, "Mechanical oscillator tip-to-sample separation control for near-field optical microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, pp. 1291-1295, 1997.
- [14] J. Salvi, P. Chevassus, A. Mouflard, S. Davy, M. Spajer, and D. Courjon, "Piezoelectric shear force detection: A geometry avoiding critical tip/tuning fork gluing," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, pp. 1744-1746, 1998.
- [15] "Enhancement of shear-force detection sensitivity using asymmetric response of tuning forks for near-field scanning optical microscopy," submitted to *Appl. Phys. Lett.*, 2004.
- [16] G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. Van Rosmale and K. Schouhamer Immink: *Principles of optical disc system* (Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston) pp. 41, 1986.
- [17] J. Yoo, C. Lee, K. Cho, H. Choi, and J. Lee, "An optical head with special annular lens for laser disc-compatible digital versatile disc pickup," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 2184-2188, 1998.

Near field scanning optical interferometer using facet reflection of a tapered optical fiber

Jang-Hoon Yoo, Sang-Youp Yim, Hyun-Ho Lee, and Seung-Han Park[†]

National Research Laboratory of Nonlinear Optics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

[†]*E-mail: shpark@phya.yonsei.ac.kr*

(Received March 25, 2004, Revised manuscript May 6, 2004)

We propose a near-field scanning optical interferometer (NSOI) based on the facet reflection of a nano-sized moveable tapered optical fiber. The interferometer can measure the position and the wave-front of a focused spot simultaneously. The interfering fringes are generated by the reflected beams from the sample surface and from the fiber facet. The wave-front analysis at the focusing position is obtained by using a phase shifting technique with a four-step algorithm. It is found that the resolution for controlling the focal position of our proposed NSOI is less than $\lambda/3$ and the measured wave-front aberration at the focal position is in good agreement with the ones obtained by a Twyman-Green interferometer.

OCIS Codes : 120.3180, 120.5050, 180.5810, 220.4840.