

## 4분할 광검출기를 이용한 표면 추적 효과의 공초점 현미경\*

김수철 · 송장섭 · 권남익

한국외국어대학교 물리학과

(1997년 11월 29일 받음)

CD-Player에서 사용되고 있는 4분할 광검출기를 이용하여 작고 간단하며 표면 추적 효과를 가지는 공초점 현미경을 구성하였다. 구성된 공초점 현미경은 4분할 광검출기에서 검출되는 오차 신호의 거리에 따른 변화를 이용하였다. 초점 근처에서 민감하게 변하며 양극성인 성질을 가지는 오차 신호를 이용하여 표면 추적을 하지 않아도 정확한 높이 변화를 알 수 있는 표면 추적 효과를 얻었다. 또한 시료의 높이 차이가 크지 않을 경우 반사 신호를 통하여 재질의 차이까지 알 수가 있다. 구성된 공초점 현미경은 간단한 조작으로 반사 신호를 이용하여 영상을 구현 할 수도 있어 두 방식으로 얻은 결과를 비교, 분석하였다.

### I. 서 론

공초점 현미경은 광원에서 나온 광속을 집속 렌즈에 의해 시료 표면에 조사하고, 시료 표면에서 반사되어 나오는 광속의 변화를 검출기로 검출하여 영상으로 구현하는 주사형 현미경이다. 공초점 현미경은 STM이나 SEM보다 해상도는 떨어지나, 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없는 시료 표면의 거칠기나 높이의 변화를 3차원 영상으로 나타낼 수 있으며, 영상처리 속도가 빠르고 사용에 편리하다. 공초점 현미경은 현재 생물학 분야와 반도체 분야에서 널리 사용되고 있으며, 최근에는 탐침의 크기가  $1.2 \times 2.5 \times 6.5$  mm인 극소형 공초점 현미경<sup>[1]</sup>을 비롯하여 살아 있는 피부 속까지 관찰할 수 있는 공초점 현미경<sup>[2]</sup>도 개발되었다.

일반적인 공초점 현미경에서는 주로 시료 표면에서 반사되는 반사 신호의 변화를 이용하여 영상을 얻는다. 반사 신호를 이용한 공초점 현미경에서는 해상도가 주로 반사 신호의 반치폭에 의해 결정되고, 반치폭은 광원의 파장과 집속 렌즈의 NA에 의하여 결정된다. 최근에는 반사 신호의 반치폭이  $0.35 \mu\text{m}$ 이어서 수직 해상도가 2 nm까지 가능한 공초점 현미경<sup>[3]</sup>도 발표되었다.

공초점 현미경에서의 반사 신호는 시료 표면에 초점이 위치할 경우 최대 값을 가지며 초점에서 벗어날 경우 거리 제곱의 형태로 감소<sup>[4]</sup>하게 된다. 그러므로 초점에서 같은 거리만큼 올라오거나 내려가 있는 곳에서 검출되는 반사 신호의 크기가 같아지게 되어 초점 전 후의 다른 높이도 같은 높이로 처리된다. 이로 인해 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경에서는 초점 근처에서의 신호를 이용하지 못하고 시료 표면이 초점 조금 전이나 조금 후에 위치해야 한다. 이것은 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경에서 해상도가 떨어지게 되는 원인이 되기도 한다. 또한 반사율이 다른 두 가지 재질로 이

루어진 시료인 경우 반사율에 따라 검출되는 반사 신호의 크기가 달라지므로 같은 높이도 다르게 나타난다.

시료의 정확한 높이 변화를 측정하기 위해서 일반적으로 표면 추적 방식의 공초점 현미경이 주로 사용된다.<sup>[5]</sup> 그러나 표면 추적 방식의 공초점 현미경은 시료의 반사율에 관계없이 정확한 높이 변화를 측정할 수 있는 반면 초점이 시료의 굴곡을 따라 움직이기 때문에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다.

위와 같이 시료 전체의 높이 변화가 모호해 지는 경향이 있는 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경의 문제와, 시간이 많이 걸리는 표면 추적 방식의 공초점 현미경의 문제를 보완하기 위하여 새로운 방식의 공초점 현미경을 구성하였다. 4분할 광검출기<sup>[6]</sup>를 사용하여 구성된 표면 추적 효과의 공초점 현미경은 초점이 시료의 굴곡을 따라 움직이는 표면 추적을 하지 않고도 동일한 표면 추적 효과를 나타낸다. 표면 추적 효과의 공초점 현미경은 오차 신호 적분 방식 공초점 현미경<sup>[5]</sup>과 같은 표면 추적 방식과는 달리 짧은 시간동안 시료 표면의 정확한 높이 변화뿐만 아니라 재질의 차이까지 알 수 있다.

또한 일반적인 공초점 현미경에서 좋은 영상을 얻기 위해 주로 쓰이는 pinhole<sup>[7]</sup>이나 단일 모드 optical fiber<sup>[8]</sup> 등과 같은 광학적 부품을 오차 신호를 이용한 표면 추적 효과의 공초점 현미경에서는 사용하지 않기 때문에 정렬이 쉬울 뿐 아니라 작고 간단해 진다.

### II. 실험

그림 1은 오차 신호를 이용하는 표면 추적 효과 공초점 현미경의 실험 구성도이다. 시료 표면에서 반사되는 광속은 빗살가르개와 원통형 렌즈를 통과하여 4분할 광검출기에서 검출된다. 원통형 렌즈는 단일 방향으로만 렌즈의 구실을 하고 또 다른 방향으로 렌즈의 구실을 하지 않기 때문에 광속은 비점 수차를 가지게 되어 초점 전에는 세로로 긴 타원, 초점 후에는 가로로 긴 타원, 초점에서는 원형의 상이 4분할 광검

\*본 연구는 1997년도 한국과학재단 핵심전문연구비와 교육부 기초과학 학술연구조성비(BSRI-97-2429)의 지원을 받아 수행된 과제임.

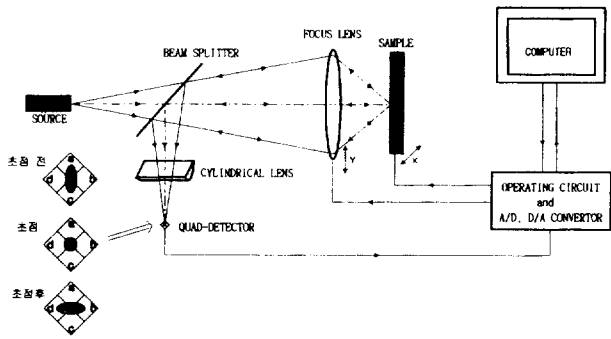


그림 1. 오차 신호를 이용한 표면 추적 효과 공초점 현미경의 실험 구성도.

출기에 형성된다. 4분할 광검출기 각 부분에서 검출되는 신호들은 연산에 의해 오차 신호  $((I_a+I_c)-(I_b+I_d))$ 와 반사 신호  $((I_a+I_c)+(I_b+I_d))$ 를 만든다. 따라서 연산에 의한 오차 신호는 초점 전에는 양의 값을 가지며, 초점 후에는 음의 값, 초점에서는 영의 값을 가지게 되어 양극성인 성질을 보이게 된다. 이 방법은 현재 상용의 compact disk player와 laser disk player에서 레이저 초점을 compact disk나 laser disk 표면에 위치시키기 위하여 사용되고 있다.

그림 2는 거울을 시료로 사용하여 축방향으로 200  $\mu\text{m}$  움직이면서 측정한 오차 신호와 반사 신호를 나타낸 것이다. 반사 신호는 초점을 기준으로 하여 거리의 제곱에 비례하여 변하고 있으며 반치폭은 약 75  $\mu\text{m}$ 이고, 오차 신호는 초점 전 후 약 18  $\mu\text{m}$ 이내에서 급격히 변화하고 있다. 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경에서는  $\alpha$  구간 안에서 반사 신호의 거리에 따른 변화를 이용한다. 구성한 공초점 현미경에서 반사 신호의 반치폭이 큰 이유는 4분할 광검출기 전체 크기가 크기 때문이다.

표면 추적 효과의 공초점 현미경은 초점 근처 약 18  $\mu\text{m}$ 이내에서 급격히 변하는 오차 신호 중 선형적으로 증감하는 부분( $\beta$  구간) 약 7  $\mu\text{m}$ 이내의 오차 신호의 거리에 따른 변화를 그대로 이용한 것이다. 오차 신호는 초점 근처에서 양극성인 성질을 가지고 있어 초점 전 후 시료 표면의 높이 변화를 정

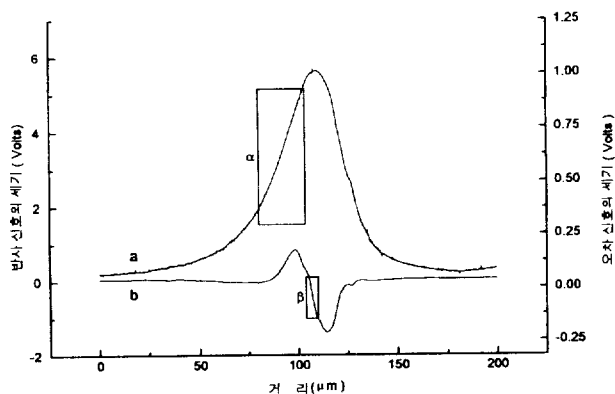


그림 2. 거울을 시료로 사용하여 종축으로 200  $\mu\text{m}$  움직이면서 4분할 광검출기로 부터 얻은 오차 신호와 반사 신호 (a : 반사 신호, b: 오차 신호)

확히 알 수가 있으며, 오차 신호의 급격한 변화와 초점 근처의 신호를 이용할 수 있으므로 해상도가 뛰어나게 된다. 또한 시료의 높이 변화가 크지 않고, 초점 근처에 시료 표면이 위치할 경우 반사 신호의 급격한 변화는 반사율이 다른 재질의 변화를 의미하므로 반사 신호의 변화를 통하여 재질의 차이까지 알 수 있다.

만일 시료 표면에서 재질의 변화로 반사율이 줄었을 경우, 반사 신호의 크기는 작아지고 오차 신호의 진폭도 작아지게 된다. 그러므로 반사율이 서로 다른 재질로 이루어진 시료인 경우, 같은 높이에 대한 오차 신호 크기가 달라지게 된다. 즉, 실제로 같은 높이인 경우에도 오차 신호를 그대로 사용하게 되면 다른 높이로 나타나게 된다. 그래서 반사 신호를 이용하여 오차 신호를 보정해 주었다. 그림 2에서 나타난 것처럼  $\beta$  구간에서 반사 신호가 거의 변하지 않기 때문에 오차 신호를 반사 신호로 나누어주었다. 그러면 반사율이 낮은 표면에 의한 오차 신호의 진폭이 커지게 되며,  $\beta$  구간에서 기울기가 반사율에 영향을 받지 않고 같게 된다. 반사율에 따른 오차 신호의 크기를 보정하게 되면 반사율에 따른 높이의 오차도 없앨 수 있으며, 반사율이 낮은 부분에서도 정확한 높이의 영상을 얻을 수 있다.

주사 방식은 시료를 붙인 actuator에 의해서 X 축을 scan하고, 짐속 렌즈가 붙어 있는 actuator에 의해 Y 축을 scan 하는 형태이다. Actuator는 CD-player용 magnet galvanometer를 사용하였다. Actuator의 최대 변위는 1.6  $\mu\text{m}$ 이므로 최대 scan영역은  $1.6 \times 1.6 \mu\text{m}^2$ 이다.

### III. 결 과

그림 3-5는 CMOS chip 표면의 영상이며, 전체 크기는  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ , scan point는  $256 \times 256$  이다. 영상에 나타난 부분은 반사율이 높은 금속 부분과 반사율이 낮은 기판 부분의 두 가지 재질로 이루어져 있다.

그림 3은 반사 신호를 이용한 공초점 현미경으로 구현한 영상이다. 금속 부분과 기판 부분이 뚜렷이 나타나 있고, 두 재질 사이의 경계가 매우 부드럽게 나타나 있다. 또한, 반사율이 낮은 기판 부분의 굴곡은 거의 나타나지 않고 있으며, 반사율이 높은 금속 부분도 매우 매끄럽게 나타나고 있다. 즉 영상이 전체적으로 반사율이 높은 부분과 낮은 부분으로만 구분되어 있다.

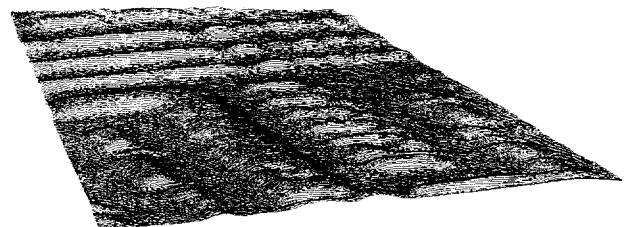


그림 3. 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경으로 구현한 CMOS chip의 영상. 전체 영상의 크기는  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이며, scan point는  $256 \times 256$ 이다.

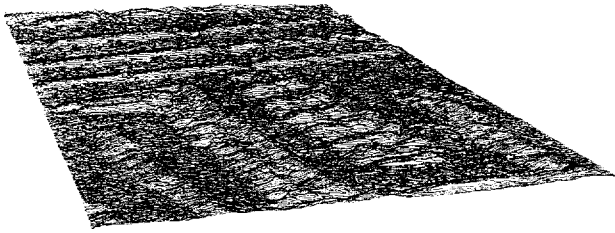


그림 4. 오차 신호만을 이용하여 구현한 그림 3 영역의 영상.

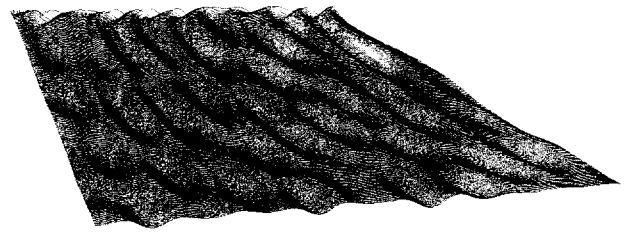


그림 6. 표면 추적 효과 공초점 현미경으로 얻은 compact disk 표면의 영상이다. 전체 영상의 크기는  $12.5 \times 12.5 \mu\text{m}^2$ 이며, scan point는  $256 \times 256$ 이다.

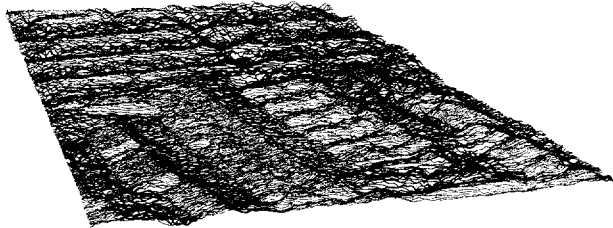


그림 5. 반사 신호로 오차 신호를 보정한 표면 추적 효과의 공초점 현미경으로 얻은 그림 3 영역의 영상.

그림 4는 오차 신호만을 이용하여 구현한 그림 3 영역의 영상이다. 즉, 반사율에 따른 오차 신호의 크기를 보정하지 않았을 경우이다. 오차 신호만을 이용하였기 때문에 반사율이 큰 금속 부분의 굴곡이 뚜렷이 나타나고 있으나, 반사율이 작은 기판 부분의 굴곡은 거의 나타나지 않고 있다. 이로 인해 하나의 재질로 이루어진 시료에서는 반사 신호를 이용한 공초점 현미경보다 선명한 영상을 얻을 수는 있으나, 둘 이상의 재질로 이루어진 시료에서는 반사율에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 반사 신호로 오차 신호를 보정한 표면 추적 효과의 공초점 현미경으로 얻은 영상이다. 우선 두 재질 사이의 높이 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 반사율이 낮은 기판 부분의 굴곡이 잘 나타나고 있으며 반사율이 높은 금속 부분의 굴곡도 뚜렷이 나타나고 있다. 즉, 재질의 변화에 따른 반사율에 영향을 받지 않고, 전체적으로 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 반사율의 급격한 변화에 따른 재질의 차이는 선 굵기의 차이로 나타내었다. 굵은 선으로 표현된 부분은 반사율이 낮은 기판 부분이다.

그림 6은 compact disk의 표면을 표면 추적 효과 공초점 현미경으로 얻은 영상이다. 전체 영상의 크기는  $12.5 \times 12.5 \mu\text{m}^2$ 이며, scan point는  $256 \times 256$ 이다. compact disk는 길이가  $0.9 \sim 3.3 \mu\text{m}$ , 폭이  $0.4 \mu\text{m}$ 이고, 깊이가  $0.11 \mu\text{m}$ 인 pit에 정보를 저장한다. 일반적인 금속 현미경으로는 관측 할 수가 없었던 compact disk 표면의 pit에 형태가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. Compact disk를 반사 신호를 이용한 공초점 현미경으로 구현한 영상<sup>[10]</sup>에서는 pit이 트랙 상에 일정하게 나열되어 있는 것만 알 수 있었다. 그러나 오차 신호를 이용하여 표면 추적 효과의 공초점 현미경으로 구현한 영상에서는 일정하지 않은 pit의 길이가 뚜렷이 나타날 정도로 수평 해상도가 뛰어난 것을 알 수 있다.

#### IV. 토 의

4분할 광검출기에서 검출되는 오차 신호를 이용하여, 초점이 시료의 굴곡을 따라가지 않으면서도 표면 추적 효과를 나타내는 공초점 현미경을 구성하였다. 초점 근처 약  $7 \mu\text{m}$  이내에서의 오차 신호는 거리에 따라 선형적으로 민감하게 변하며, 양극성인 성질이 있어 시료 표면의 정확한 높이 변화를 알 수 있다. 또한 초점 근처에서의 반사 신호의 변화를 통하여 재질의 차이까지 알 수 있다. 그러나 초점 근처의 오차 신호 중 선형적으로 증감하는 부분이 약  $7 \mu\text{m}$ 이기 때문에 시료의 높이 차이가  $7 \mu\text{m}$  이상 되는 시료의 높이 변화는 알 수가 없는 단점도 있다. 그러므로 높이 차이가 약  $7 \mu\text{m}$  보다 작고, 여러 재질로 이루어진 시료의 표면을 조사하는데 오차 신호를 이용한 표면 추적 효과의 공초점 현미경을 이용하면 반사 신호를 이용하는 공초점 현미경보다 정확한 영상을 얻을 수 있으며, 표면 추적법 공초점 현미경보다는 빠른 시간 안에 영상을 얻을 수 있을 것이다. 또한 구성한 공초점 현미경에서 광원의 파장, 집속 렌즈와 원통형 렌즈의 NA를 개선해 준다면 좀 더 뛰어난 해상도를 가질 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] D. L. Dickensheets and G. S. Kino, Opt. Lett. **21**, 10, 764 (1996).
- [2] Milind Rajadhyaksha and James M. Zavislan, Laser Focus World, February, 119 (1997).
- [3] Chau-Hwang Lee, Jyhyng Wang, Opt. Commun. **135**, 233 (1997).
- [4] T. Wilson, ed., *Confocal Microscopy* (Academic, London, 1990).
- [5] 유석진, 김수철, 이진서, 권남익, 한국광학회지. **8**, 2, 165 (1997).
- [6] 정기혁, 도해 콤팩트 디스크 (가남사, 서울, 1988), 187
- [7] R. Juskaitis, N. Rea and T. Wilson, Opt. Commun. **99**, 105 (1993).
- [8] R. Juskaitis, N. P. Rea and T. Wilson, Appl. Opt. **33**, 578 (1994).
- [9] 이진서, 유석진, 조정석, 권남익, 응용물리. **9**, 4, 440 (1996).

## **Scanning confocal microscope of a surface following effect using a quad-detector**

Soo-chul Kim, Jang-sup Song and Namic Kwon

*Department of Physics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 449-791, Korea*

(Received : November 29, 1997)

A compact scanning confocal microscope has been constructed using a quad-detector in a CD-player. The variation of error signal on depth which obtained by a quad-detector is used in the scanning confocal microscope. Bipolar error signals, which is sensitive near a focus, give a surface following effect without following the surface. In the case of small depth difference, the difference of materials through the reflection signal has been identified. The image which uses reflection signal only, has been obtained with the same setup. And, the results obtained in two different way were compared and analyzed.