

마이켈슨 간섭계형 현미경의 특성 연구*

김경신 · 권남익

한국의국어대학교 물리학과

(1999년 5월 21일 받음, 1999년 7월 28일 수정본 받음)

마이켈슨 간섭계를 이용한 간섭계형 현미경을 구성하고 특성을 조사하였다. 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 시료 표면의 반사 신호와 거울의 반사 신호가 합쳐져서 일어난 간섭 신호를 이용해서 3차원 영상을 얻는다. He-Ne($\lambda = 633 \text{ nm}$) 레이저를 사용한 마이켈슨 간섭계는 반과장(312.5 nm)의 경로차가 생길 때마다 같은 무늬가 반복해서 나타난다. 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 이러한 간섭 신호를 이용하기 때문에 white-light interferometer 수준의 수직 해상도를 얻을 수 있었다. 구성한 마이켈슨 간섭계형 현미경으로 얻은 영상을 공초점 현미경의 영상과 비교 분석하였다.

I. 서 론

광학적 3차원 영상의 구현은 레이저광 등을 이용하여 많이 발전되어 왔다. 그 중에서도 작고 간단한 장치로 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없었던 시료 표면의 거칠기나 구부러짐, 패임 등을 관측하는 분야 중 레이저를 이용한 간섭계형 현미경과 공초점 현미경에 대한 연구는 오래 전부터 시작되었고, 다양한 이유로 많은 관심이 증가되어져 왔다. 이러한 이유 중에는 간섭계형 현미경과 공초점 현미경이 매우 뛰어난 해상도의 3차원 영상을 얻을 수 있는 뛰어난 기술일 뿐만 아니라, 영상처리 시스템과 데이터처리 시스템 가격이 저렴해지고 반도체 레이저가 널리 상용화되기 시작하면서이다.^[1] 1980 년대에 접어들면서 Tony Wilson^[1]에 의해서 활발한 연구가 시작되었고, 최근까지도 계속적인 연구가 진행되고 있으며, 다양한 분야에 응용되고 있다.

공초점 현미경은 STM이나 SEM보다 해상도는 떨어지나 일반적인 광학 현미경으로는 관측이 불가능한 시료면의 거칠기나 구부러짐, 패임 등을 관측할 수 있고 세포 생물학과 유전자 연구 같은 생물학 분야^[2]뿐만 아니라 반도체 연구 등 많은 분야에 폭넓게 이용되고 있다. 생물학 분야에서는 Laser Diagnostic Technologies^[3]에서 이미 공초점 레이저 단층 촬영 장치를 상용화 시켰을 뿐만 아니라 공초점 레이저를 이용하면 살아있는 피부 속까지 관측할 수 있다.^[4] 최근에는 탐침의 크기가 $1.2 \times 2.5 \times 6.5 \text{ nm}$ 인 극소형 공초점 현미경^[5]도 개발되었다. 반도체 표면 결함을 측정하고자 할 때에는 조작이 간단하고, 처리 속도가 빠른 공초점 현미경으로 전체적인 영상을 구한 후, 결함 부분을 근해상도의 STM이나 SEM으로 검사해서 반도체 표면 상태를 점검할 수 있다.^[6]

광파의 간섭이란 두 개 혹은 그 이상의 광파가 상호 작용하여 얻어진 합성파의 복합조도가 각 성분 광파들의 복사조도를 단순히 더한 값과 달라지는 현상이다.^[7] 이러한 간섭을 이용한

기존의 간섭계는 광원을 단색광을 사용함으로써 다양한 형태의 현미경으로 발전되어 왔다. 그 예로 마흐-젠더 간섭계를 이용한 투과 모드와 공초점 현미경을 Brakenhoff가 1979년에 제작하였다.^[11] Brakenhoff가 제작한 투과 모드의 간섭계형 공초점 현미경은 시료를 한쪽 경로에 물체를 삽입하면 두 광파 사이에는 굴절률의 차이에 따라 간섭무늬가 발생한다.^[7] 이러한 간섭무늬를 통해 시료의 굴절률을 알 수 있다. 최근에는 He-Ne 레이저를 가지고 dc 되먹임과 변조 되먹임 기술을 사용한 간섭계형 공초점 현미경도 개발되었다.^[8] 이러한 간섭계형 공초점 현미경은 He-Ne 레이저 위상과 시료에서 반사된 빛의 위상간의 간섭 신호를 가지고 영상을 얻는다.

본 실험에서는 공초점 현미경의 lateral 분해능을 가지면서 고분해능의 깊이 분석력을 가진 현미경을 만들기 위하여 Hamilton과 Sheppard가 1982년에 제작한 마이켈슨 간섭계형 공초점 현미경^[11]에서 집속렌즈와 pinhole를 제거한 간섭계형 현미경을 구성하였으며 이의 특성을 조사하였다. 구성한 마이켈슨 간섭계형 현미경은 He-Ne 레이저 cavity를 이용한 dc 변조와 되먹임 변조 방식보다도 alignment도 쉬워지고 구조도 간단해 졌다.

백색광을 사용하는 white-light interferometer는 광로차가 파장의 1/2를 넘어가면 단색광 성분들의 간섭무늬가 사라지는 반면, 단색광을 이용한 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 광로차가 광원 파장의 1/2를 넘어가도 계속적으로 간섭무늬가 나타나기 때문에 시료의 어느 한 부분의 깊이가 광원의 1/2를 넘어간다면 실제 시료의 영상과 다르게 나올 수가 있다. 부분적으로 시료의 거칠기나 패임 등에 그 이상의 변화가 있을 때는 일반적인 공초점 현미경과 함께 사용하여 영상을 비교함으로써 확인을 하여야 한다. 본 실험에서는 제작한 마이켈슨 간섭계형 현미경으로 반도체 레이저 앞 표면의 3차원 영상을 얻었으며 이를 여러 가지 형태의 공초점 현미경을 이용하여 얻은 영상과 비교하여 특성을 조사하였다.

II. 실험

본 실험에서는 He-Ne($\lambda = 633 \text{ nm}$) 레이저, 반도체 레이저

* 본 연구는 교육부 기초과학 학술연구조성비 (BSRI-98-2429) 의 지원을 받아 수행된 과제임

($\lambda = 780 \text{ nm}$)를 이용해서 마이켈슨 간섭계형 현미경과 공초점 현미경을¹⁶⁾ 각각 구성하였다.

그림 1은 He-Ne($\lambda = 633 \text{ nm}$)레이저를 사용하여 구성한 마이켈슨 간섭계형 현미경의 실험 구성도이다. 만약 시료가 Z축으로 scan된다면 광검출기에서 검출되는 Z축에 따른 세기는 식 (1)로 표현되어질 수 있다.

$$I(z) = |r|^2 + |V(z)|^2 \tag{1}$$

여기서 r 은 거울에서 반사되어 돌아오는 기준 광선이고, $V(z)$ 는 시료에서 반사되어 돌아오는 복소 진폭 광선이다. 식 (1)를 다시 쓰면 다음과 같이 3항으로 쓸 수 있다.

$$I(z) = |r|^2 + |V(z)|^2 + 2|r|Re[V(z)] \tag{2}$$

(2)식의 첫 번째 항은 거울에서 반사되어 돌아오는 광선을 나타내고 두 번째 항은 시료에서 반사되어 돌아오는 광선을 나타내며, 세 번째 항은 간섭항이다. 여기서 $Re[V(z)]$ 는 시료 신호의 실수부이다.¹⁹⁾ 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 이러한 간섭항 신호의 기울기에서 3차원 영상을 얻는다.

구성한 마이켈슨 간섭계형 현미경은 nanometer의 수직 해상도를 가지므로 외부의 작은 영향에도 많은 noise가 발생하기 때문에 system을 밀폐시켰다.

공초점 현미경의 특성을 조사하기 위하여 3가지 방식의 system을 구성하였다. 첫 번째 방식은 반사광을 검출하기 위해 반도체 레이저 뒤에 붙어있는 광검출기를 직접 사용하여 되먹임 신호를 검출하였다. 시료를 맞고 되먹임된 신호는 광검출기에 감지되어 전류가 증가하게 된다. 광검출기에서 검출된 전류는 시료의 반사량이 없을때의 전류를 빼준 후 I-V converter회로를 구성하여 증폭하였다. 이러한 되먹임된 반사 신호를 가지고 영상을 얻었다. 두 번째, 세 번째 방식은 CD-player에서 사용되고 있는 4분할 광검출기 앞에 원통형 렌즈를 놓는 비점수차 방식을 통해 얻은 미분신호와 합산신호로 영상을 얻었다. 이 방법은 현재 compact disk player와 laser disk player에서 레이저 초점을 compact disk나 laser disk 표면에 위치시키기 위하여 사용되고 있다.¹⁰⁾

반도체 뒤에 붙어있는 광검출기를 이용한 되먹임 신호, 4분할 광검출기를 사용한 합산신호, 그리고 단일 모드 광검출기

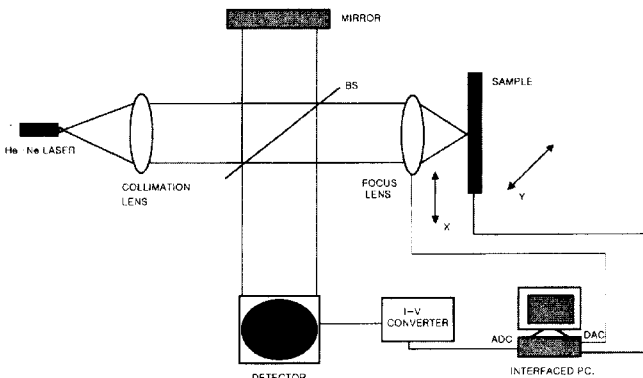


그림 1. He-Ne($\lambda=633 \text{ nm}$) 레이저를 사용하여 구성한 마이켈슨 간섭계형 현미경의 실험구성도이다.

를 이용한 간섭신호는 초점을 기준으로 같은 거리만큼 올라오거나 내려가 있는 곳에서 검출되는 신호의 크기는 같아지게 되므로 초점 전후의 다른 높이도 같은 높이로 처리된다. 따라서 이 세 신호는 초점보다 약간 아래에서 영상을 얻어야 되지만, 4분할 광검출기를 사용한 미분신호는 초점을 기준으로 양극성인 성질을 가지므로 초점에서 영상을 구현 할 수 있다.

주사 방식은 시료를 붙인 actuator에 의해서 Y축으로 주사하고, 집속렌즈가 붙어 있는 actuator에 의해 X축을 주사하는 방식이다.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 반도체 레이저(HITACHI HL7851G) 앞 표면을 시료로 사용하여 마이켈슨 간섭계형 현미경의 간섭 신호로 얻은 집합 영역의 영상이다. Z축상의 거리가 고정된 상태에서 XY 평면상에서 scan하였으며 전체 크기는 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이고 scan point는 256×256 이다. 집합 양쪽의 두 층이 다른 표면 구조를 가지고 있음을 알 수 있고 위층은 X축 방향으로만 굴곡을 가진 구조를 하고 있다는 것을 알 수가 있다. X축상의 편차가 310 nm 이하가 되는 범위 내에서 X축의 기울기를 바꾸어서도 비슷한 영상을 얻음으로써 이 굴곡이 실제임을 알 수 있었으며 이를 다시 일반적인 공초점 현미경의 영상과 비교함으로써 확인하였다.

또한 시료의 XY 평면은 위층의 한 점에 고정하고 Z축으로 scan해서 얻은 간섭 신호의 세기변화가 위층의 깊이 변화보다 약 6배정도 됨을 확인하여 위층 표면의 X축상 깊이변화가 약 50 nm 정도 이내임을 알 수 있었다. 그림 3은 반도체 레이저 뒤에 붙어있는 광검출기와 cavity를 pinhole로 사용해서¹⁶⁾ 얻은 되먹임된 신호로 찍은 같은 영역의 영상이다.

앞에서 언급했듯이 He-Ne 레이저 cavity를 이용한 간섭계형 공초점 현미경¹⁸⁾은 간섭 신호를 가지고 영상을 얻는 현미경이다. 시료에서 반사되어 위상이 변한 광선이 He-Ne 레이저 cavity 안으로 다시 들어간다. 이때 되먹임된 광선은 공진 거울에 의해서 대부분 반사가 되므로 순환 파동을 거의 섭동시키지 않는다. 그러므로 되먹임 광선은 cavity 안에서 순환하는 파동과 위상차로 인하여 간섭을 일으킨다.¹⁸⁾ 그러나 반도체 레이저인 경우 다량의 되먹임된 광선이 cavity 안으로 들어오므로 순환 파동을 섭동시킨다. 이때 두 파동은 서로 공진이 되어 간섭항이 사라지고 반도체 레이저 뒤에 붙어있는 광검출기

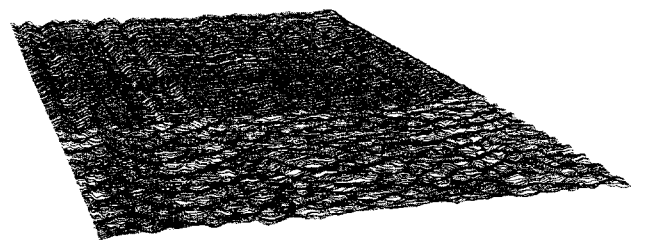


그림 2. 반도체 레이저 앞 표면을 시료로 사용하여 마이켈슨 간섭계형 현미경의 간섭 신호로 얻은 영상이다. 전체 크기는 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이고 scan point는 256×256 이다.

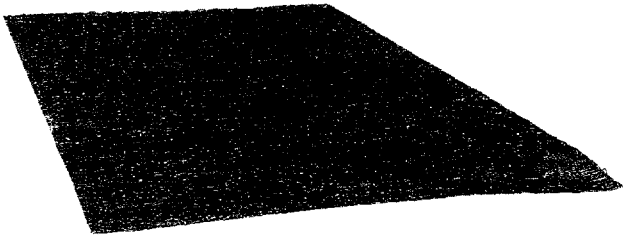


그림 3. 반도체 레이저 앞 표면을 시료로 사용하여 공초점 현미경의 되먹임 신호로 얻은 그림 2 영역의 영상이다.

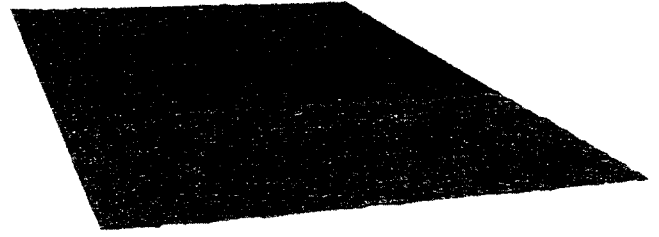


그림 5. 반도체 레이저 앞 표면을 시료로 사용하여 공초점 현미경의 미분 신호로 얻은 그림 2 영역의 영상이다.

에서 검출되는 신호는 되먹임 광선에 비례한다. 따라서 그림 3은 반도체 레이저 cavity를 사용한 공초점 현미경으로 찍은 영상이다.

금속 현미경으로는 관측이 불가능한 반도체의 두 층이 나타나 있음을 알 수 있으나 마이켈슨 간섭계형으로 얻은 그림 2처럼 두 층의 구조를 알 수가 없다. 되먹임된 반사신호로 영상을 얻을 때 일반적인 공초점 현미경에서 사용하는 pinhole 대신 반도체 레이저 cavity가 사용된다. 일반적인 공초점 현미경은 pinhole의 적절한 선택이 정확한 영상을 얻는데 상당히 중요하다. 레이저가 발진되는 곳은 접합부분의 가운데 일부이지만 pinhole 역할을 하는 cavity는 접합부분의 전체이다. 따라서 되먹임된 반사신호로 얻은 그림 3의 영상은 반도체 레이저 cavity가 적절한 pinhole의 역할을 못하기 때문에 해상도가 떨어짐을 알 수가 있다.

그림 4는 4분할 광검출기를 이용하여 얻은 합산신호로^[10] 같은 영역의 영상을 찍은 것이다. 그림 3보다 금속 현미경으로는 관측이 불가능한 두 층이 확실히 나타나 있음을 알 수 있다. 또한 두 층들의 표면의 거칠기나 구조를 알 수 있고, 위층은 규칙적인 구조를 가짐을 알 수 있으나 그림 2보다 해상도가 떨어짐을 알 수가 있다.

그림 5는 4분할 광검출기를 이용하여 얻은 미분신호를^[10] 가지고 같은 영역의 영상을 얻은 것이다. 그림 4보다도 두 층이 더욱 확실히 나타남 있음을 알 수 있고, 두층의 구조나 표면의 거칠기를 확실히 알 수 있다. 위층은 구조가 규칙적임을 알 수 있고, 아래층은 표면이 상당히 거칠다는 것을 알 수 있다. 미분 신호는 초점근처에서 되먹임된 신호와 합산 신호보다도 민감하게 변하며 초점을 전후로 양극성인 성질을 가진다. 따라서 미분 신호로 얻은 그림 5의 영상은 반도체 레이저 뒤에 붙어 있는 광검출기를 이용해서 얻은 되먹임된 신호의 영상과 4분할 광검출기를 이용해서 얻은 합산 신호의 영상보다

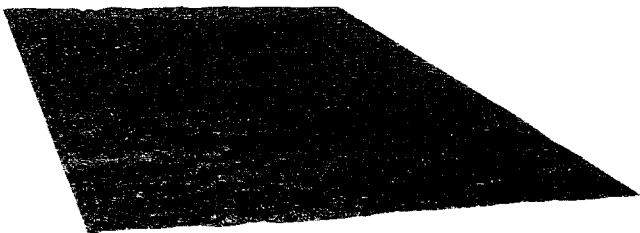


그림 4. 반도체 레이저 앞 표면을 시료로 사용하여 공초점 현미경의 합산 신호로 얻은 그림 2 영역의 영상이다.

도 해상도가 훨씬 뛰어나다. 영상의 깊이변화가 그림 2보다 적은 것으로 보아 마이켈슨 간섭계를 이용한 영상보다 수직 해상도가 떨어짐을 알 수가 있다.

본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 시료를 Z축으로 scan 했을 때 간섭계형 공초점 현미경처럼 간섭무늬의 세기의 변화가 초점 전후에서 가우스 분포를 갖지 않고 정현 함수의 형태를 가진다. 그러므로 초점이 아니더라도 초점과 같은 세기의 간섭무늬를 가진다. 따라서 정확히 초점의 간섭무늬에서 영상을 얻기 힘들기 때문에 수평 해상도가 떨어질 수 있다.

마이켈슨 간섭계형 현미경은 He-Ne 레이저를 사용하기 때문에 반파장(312.5 nm)의 광로차가 생길 때마다 같은 무늬가 반복해서 나타난다. 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 이러한 간섭신호를 이용하기 때문에 white-light interferometer 수준의 뛰어난 수직 해상도를 가진다. 그러므로 공초점 현미경의 영상보다 뛰어난 수직해상도를 얻을 수 있었다.

IV. 토 의

본 실험에서는 He-Ne($\lambda = 633 \text{ nm}$) 레이저를 사용하여 시료로부터 반사되는 반사광과 고정된 거울로부터 반사되는 기준광선을 이용하여 마이켈슨 간섭계형 현미경과 단일모드인 반도체 레이저($\lambda = 780$)를 사용하여 3가지 방식의 공초점 현미경을 구성하고 그 특성을 조사하였다. 본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 금속 현미경으로 관측 할 수 없었던 표면의 거칠기나 재질의 높이 등을 조사 할 수 있었고 nanometer의 뛰어난 수직 해상도를 얻을 수 있었다. 마이켈슨 간섭계형 현미경을 통해 얻은 간섭 신호는 외부 진동에 아주 민감하므로 noise가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 렌즈와 시료를 scan하는 actuator를 외부 영향에 안정화시킬 수 있어야 한다.

이러한 마이켈슨 간섭계형 현미경은 alignment도 쉬운 뿐만 아니라 공초점 현미경과 함께 사용함으로써 시료의 한 특정부분의 거칠기나 깊이 변화가 수 백 nanometer의 범위를 넘어갈 경우 보다 효과적이고 정확한 영상을 얻을 수 있을 것이다.

본 마이켈슨 간섭계형 현미경은 He-Ne 레이저, 광검출기 등의 광학적 부품대신 반도체 레이저, actuator, 그리고 4분할 광검출기를 내장하고 있는 CD-player용 광학적 부품을 사용하면 전체 크기도 아주 작고 alignment도 더욱 쉬운 마이켈슨 간섭계형 공초점 현미경을 구성할 수 있다. 이러한 마이켈슨 간섭계형 공초점 현미경은 부분적으로 시료의 거칠기나 패임 등의 깊이변화가 수백 nanometer를 넘어갈 경우 간단한 조작으로

공초점 현미경을 이용한 영상을 얻을 수 있다. 또한 CD-player용 광학적 부품을 사용하면 가격도 저렴해지고 외부 영향에도 더욱 안정화 될 수 있을 것이다. 따라서 CD-player용 광학적 부품을 사용한 마이켈슨 간섭계형 공초점 현미경과 일반적인 공초점 현미경이 일체형인 공초점 현미경을 계속적으로 연구 중이다.

참고문헌

- [1] T. Wilson, ed., Confocal Microscopy (Academic, London, 1984).
- [2] E. Herget and K. Kaufmann, Laser Focus World. March, s11 (1996).
- [3] R. T. Milkowski and Loney, Laser Focus World. February, 115 (1996).
- [4] Milind Rajadhyaksha and James M. Zavislan, Laser Focus World. February, 119 (1997).
- [5] D. L. Dickensheets and G. S. Kino, Opt. Lett. **21**, 10, 764 (1996).
- [6] 이진서, 유석진, 조정석, 권남익, 응용물리 **9**, 4, 440 (1996).
- [7] Eugene Hecht, Optics 2nd ed. (Add, New York, 1987).
- [8] R. Juskaitis, T. Wilson, N.P. Rea, Opt. Comm. **109**, 167 (1994).
- [9] H. Zhou and C. J. R. Sheppard, J. Mod. Opt. **44**, 8, 1553 (1997).
- [10] 김수철, 송장섭, 권남익, 한국광학회지 **9**, 1, 1 (1998).

The study of property on the michelson interferometric microscopy

Kyung-shin Kim and Namic Kwon

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

(Received May 21, 1999, Revised manuscript received January 28, 1999)

We have constructed an interferometric microscopy using a Michelson interferometer and a He-Ne laser. The three dimensional image was obtained by the interference from the reflected signal by a sample surface and from the reflected signal by a mirror. The axial resolution obtained by Michelson interferometric microscopy is as good as that of the white-light interferometer, but the same fringe is obtained when optical path difference is half-wavelength. The image from michelson interferometric microscopy was compared with the images from the various types of confocal microscopy.