

광섬유 공초점 간섭 현미경과 위상 변위법을 결합한 표면 검색

김대찬 · 이승걸

인하대학교 전자재료공학과

(1999년 3월 17일 받음, 1999년 5월 12일 수정본 받음)

단일모드 광섬유와 광섬유 결합기를 이용하여 간결한 구조의 광섬유 공초점 간섭 현미경을 구성하였으며, 위상 변위법을 응용한 표면 검색 방법을 제안하여 통신용의 반도체 레이저와 같이 비교적 긴 파장의 광원과, 낮은 NA의 대물렌즈를 사용하더라도 정밀한 시료 표면 검색이 가능함을 보였다. 이때 시료 표면의 높낮이는 시료로부터 반사된 빛의 위상으로부터 결정되며, 종래의 공초점 현미경에 비하여 주사시간을 크게 단축할 수 있었다. 끝으로 종래의 방법에 비해 제안된 방법은 시료의 반사율 변화에 덜 민감함을 확인할 수 있었다.

I. 서 론

공초점 현미경은 점광원과 점 검출기를 사용함으로써 일반 현미경에 비하여 횡방향 분해능이 높고, optical sectioning 효과를 가진다. 이러한 특성으로 인해 시료의 3차원 영상 및 표면 형상 측정이 가능하므로, 공업적인 계측뿐만 아니라 의료, 생물학에 이르기까지 광범위한 분야에서 활용되고 있다.^[1] 최근 활발히 연구되고 있는 광섬유 공초점 현미경(fiber optical confocal scanning microscope; 이하 FOCSM라 함.)은 편출대신에 광섬유를 사용하는 것으로 공초점 현미경의 특성을 그대로 가지면서도 보다 단순한 구성이 가능하다. 또한, reciprocal scheme을 적용하면 정렬 오차가 극적으로 줄어드는 이점을 가진다.^[2-5] 특히 단일모드 광섬유를 사용할 경우 시간적 가간섭성(temporal coherence)이 우수하여 간섭계 구성에 적합하다.^[6]

한편, 기존 공초점 현미경을 간섭 현미경으로 구성하면, 즉, 공초점 간섭 현미경을 구성하게 되면, 수 nm 이하의 종방향 분해능과 높은 횡방향 분해능을 가지게 된다. 또한, 측정 방법에 따라서는 종방향의 주사 없이 표면 높낮이를 결정할 수 있으므로 주사시간을 단축할 수 있다.^[7] 물론, 공초점 간섭 현미경을 구성하기 위해서는 간섭계 구성이 추가되어야 하므로, 전체적인 구성이 복잡해지며 정교한 정렬이 요구된다. 그러나, 정렬오차가 적은 reciprocal scheme의 FOCSM을 기본 구성으로 하여 광섬유 결합기 등을 활용하게되면 매우 간결한 구조의 광섬유 공초점 간섭 현미경(fiber optical confocal scanning interference microscope; 이하 FOCSIM라 함.)을 구성할 수 있다. 종래의 공초점 간섭 현미경이 광속 분할기(beam splitter)와 거울 등을 사용하여 reference arm을 구성되었던 것과 달리 FOCSIM에서는 한 가닥의 광섬유나 광섬유 결합기(fiber-optic coupler)를 사용하여 간섭 현미경을 쉽게 구성할 수 있다.^[8-9] 광섬유 결합기를 사용하는 경우, 입사된 빛은 두 가닥의 광섬유로 각각 분리되는데, 한쪽 광섬유의 종단면으로부터 반사된 빛을 기준 광속(reference beam)으로 활용할 수 있었다. 또한, 한 가닥의 광섬유를 사용하는 경우에는 광섬유

종단면을 index matching하지 않음으로써 단면으로부터 반사되는 약한 반사광을 기준 광속으로 사용할 수 있었다. 그러나, 이러한 구성에서는 광섬유 종단면의 반사율에 의해 기준 광속의 세기가 일정한 값으로 고정될 수밖에 없다. 사실 시료의 종류에 따라서 시료 표면의 반사율이 달라지며, 간섭효과는 기준 광속과 시료로부터 반사된 신호의 세기가 같을 때 가장 크게 나타나므로 기준 광속의 세기를 적당한 크기로 조절해야 할 필요가 있을 것이다. 또한, 간섭형 종방향 특성 곡선(interference axial response curve)으로부터 시료 표면 높낮이를 결정하는 공초점 간섭 현미경에 있어서는 기준광의 세기를 최적화 하여야 할 필요가 있음이 이미 보고된 바 있다.^[10]

따라서, 본 연구에서는 광섬유 결합기를 이용하는 기존 FOCSIM의 구성을 변형하여 기준광의 세기 및 위상을 인위적으로 조절할 수 있는 구성을 제안하며, 위상을 조절할 수 있는 장점을 활용함으로써, FOCSIM에 의해 시료의 표면 형상을 검출하는 방법을 새로이 시도하였다. 최근 FOCSIM의 간섭 결과로부터 시료의 표면 높낮이를 결정하기 위해 광원의 주파수를 변조하는 방법이 제안되었으나,^[8] 제안된 구성을 활용할 경우 기준 광속의 위상을 단계적으로 변화하면서 각 점의 간섭광의 세기를 측정하는 즉, 위상 변위법(phase shifting method)으로 시료 표면을 검색할 수 있을 것이다. 또한 주사 방식에 있어서는 대물렌즈 주사방식과 시료 주사방식이 모두 가능하도록 설계하여 기준 광속을 차단하고 대물렌즈 주사방식으로 구동하면 기존의 공초점 현미경으로 쉽게 전환될 수 있도록 함으로써 다양한 목적으로 사용될 수 있도록 하였다. 이하 본문에서는 제안된 FOCSIM에 의한 측정 원리와 여러 가지 측정 mode를 살펴보고, 이론적인 분해능을 고찰하였다. 끝으로 실험 및 실제 시료의 표면 검색 결과에 대하여 논의한다.

II. 위상 변위법과 결합한 표면 검색 방식

2.1. 광섬유 공초점 간섭 현미경의 종방향 분해능

시료 표면의 한 점에 대해 FOCSM을 종방향으로 주사하면, 위치에 따라서 신호(시료로부터 반사된 광) 세기가 변하게 되

며, 공초점 관계가 만족되는 지점에서 최대의 반사광 세기가 검출된다. 이와 같이 종방향 주사과정에서 얻어진 반사광 세기 변화를 종방향 특성 곡선(axial response curve)이라 하며, 그 반치폭(FWHM)은 종방향 분해능의 기준이 된다. 공초점 현미경을 이용하는 표면 검색에서는 최대의 반사광 세기가 검출되는 지점을 측정함으로써 시료 표면의 높낮이를 결정하게 되는데, 반치폭이 작을수록 정밀도는 향상될 것이다. reciprocal scheme의 FOCSM에서 시료가 평면 거울일 경우, 측정되는 빛의 세기는 정규화 좌표 u 에 대하여

$$I(u) = \left| \frac{A(1 - \text{Exp}[-(A + iu)])}{(1 - \text{Exp}[-A])(A + iu)} \right|^2 \quad (1)$$

$$u = (8\pi/\lambda)z \sin^2(\alpha/2)$$

$$A = (2\pi a_0 r_0 / \lambda d)^2$$

와 같이 표현되며,^[6] 여기서 z 는 종방향의 실제 좌표이며, A 는 차원이 없는 변수로서 광섬유의 정규화된 spot size이다. A 의 표현식에서 a_0 는 대물렌즈의 반경이고, d 는 점광원과 collimating lens사이의 거리, r_0 는 fiber spot size, α 는 수치구경 NA와 $\alpha = \sin^{-1}(\text{NA})$ 의 관계를 갖는다. 식(1)에서 알 수 있듯이 FOCSM의 반치폭은 광원의 파장, NA, 및 광섬유의 spot size 등에 의존한다. 한편, FOCSIM에서는 FOCSM의 반사광과 기준 광속이 서로 간섭하므로, 공초점 관계를 만

족하는 위치에서의 두 광속이 보강간섭 조건을 만족한다면, 종 방향으로 주사할 때 검출되는 신호 세기는

$$I(u) = \left| \text{Exp}\left[-\frac{i u}{2 \sin^2(\alpha/2)}\right] \frac{A(1 - \text{Exp}[-A + i u])}{(1 - \text{Exp}[-A])(A + i u)} \right|^2 \quad (2)$$

와 같이 표현된다.^[9] 이 결과를 FOCSIM의 간섭형 종방향 특성 곡선이라 하며, 식(2)에서 공초점 관계가 만족되는 위치에서 반사광의 세기와 기준 광속의 세기가 같다고 가정하였다.

식(1)과 (2)로부터 계산한 종방향 특성 곡선을 그림 1(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 이때 광원의 파장은 1550 nm, 대물렌즈의 NA는 0.85로 설정하였으며, 이는 실제로 구성될 FOCSIM과 같은 조건이다. 이 경우 A 값은 대략 9.2가 되는데, 이 값은 광섬유 공초점 간섭 현미경에서는 비교적 큰 값에 해당한다. Fig. 1(a)에서 종방향 특성 곡선의 반치폭은 약 4.5 μm 정도로 예상되므로, 최대의 반사광 세기가 검출되는 지점을 이용하는 기존 방식으로는 구성될 FOCSM을 정밀한 표면 검색에 활용할 수 없음을 알 수 있다. 또한, Fig. 1(b)에 나타낸 FOCSIM의 간섭형 종방향 특성 곡선은 광원 파장의 반 주기로 진동하는 모양을 보이고 있다. 이미 알려진 바와 같이 Fig. 1(b)에서 개별 무늬의 반치폭은 반 파장 이하로 축소되지만, 대입된 A 값이 크기 때문에 인접한 무늬의 상대적인 크기가 별 차이가 나지 않으므로, 반치폭의 축소 효과를 표면 검색에 활용할 수 없을 것이다.^[10] 그러므로, 최대의 반사광 세기가 검출되는 지점을 측정하여 시료 표면의 높낮이를 결정하는 기존 방식 대신에 간섭 현미경의 특성을 활용하는 측정 방식이 필요하게 된다.

2.2. 위상 변위법의 적용

따라서 본 논문에서는 기준 광속의 위상을 인위적으로 변화시킬 수 있는 구성 상의 이점을 활용하여 반사광의 위상을 측정하고 이를 통해 표면의 높낮이를 결정하는 방식을 제안한다. 즉, 간섭계를 이용한 여러 가지 위상 측정 방법 중에서 이미 잘 알려진 위상 변위법을 광섬유 공초점 간섭 현미경에 결합하여 표면 검색을 시도하고자 한다. 시료 표면의 한 점에서 FOCSIM를 종방향으로 주사하는 대신에 기준 광속의 위상을 $0, \pi/2, \pi$ 로 변화시키면서, 각각 검출광의 세기 I_A, I_B, I_C 를 측정한다면, 그 점에서의 반사광의 위상 ϕ 는

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_C - I_B}{I_A - I_B} \right] \quad (3)$$

의 관계로부터 구할 수 있고, 다시 시료 표면의 높이 z 와 ϕ 의 관계

$$z = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x, y) \quad (4)$$

를 이용하여 구할 수 있다.^[11] 여기서 λ 는 사용된 광원의 파장이다. 이러한 방법을 이용하게되면 종방향의 주사과정 없이 시료 표면의 높낮이를 결정할 수 있으므로 주사 시간이 극적으로 단축될 수 있다. 다만 대물렌즈의 위치는 시료 표면의 적당한 위치에 고정되므로 얻어지는 영상은 extended focus

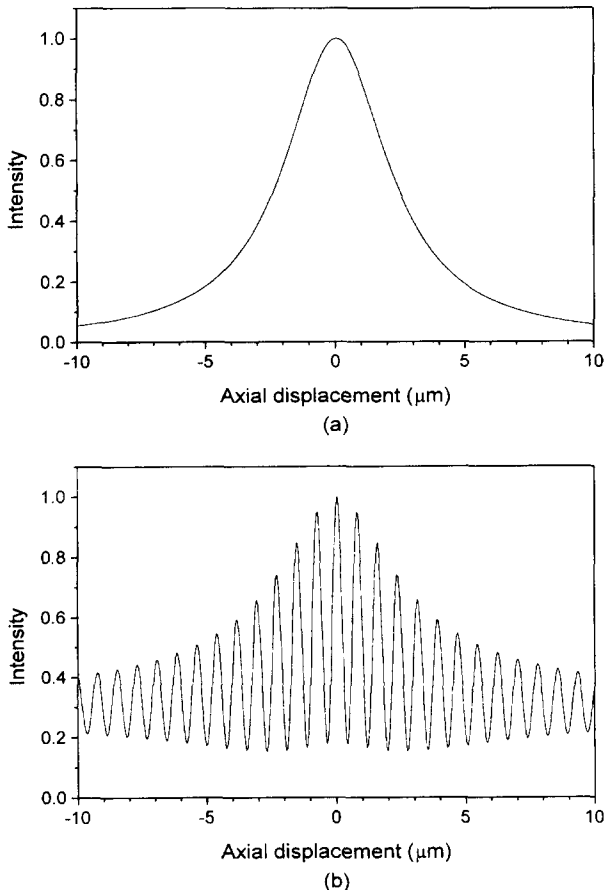


Fig. 1. Theoretical axial response curves of (a) FOCSM and (b) FOCSIM.

image일 수 없으므로 시료 주사방식에 비하여 횡방향 분해능이 나빠질 것이라고 사료된다. 그러나 본 연구에서와 같이 A 값이 큰 경우에 있어서는 기존의 시료 주사 방식에 의한 결과와 큰 차이를 가지지 않을 것이다.

사실, 광섬유 공초점 간섭 현미경의 경우, 광섬유의 열팽창을 이용한 광로정 변조방식^[4]이나 liquid crystal retarder를 이용하는 방법^[12] 등이 제안된 바 있으나, 광섬유 공초점 간섭 현미경에는 다이오드 레이저의 주입전류 변조에 의한 파장 변조방법^[8]외에는 적용된 바가 없다.

III. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

제안된 FOCSIM의 개략적인 장치도를 Fig. 2에 보였다. 파장 1550 nm의 반도체 레이저로부터 방출된 빛은 3 dB 광섬유 결합기의 왼쪽 단자를 통해 입사된 후 결합기에 의해 기준 광속의 경로(reference arm)와 신호광의 경로(sample arm)를 따라 각각 분리된다. 신호광의 경로를 구성하는 단일모드 광섬유 즉, sample arm의 끝 쪽에는 반사형 공초점 현미경이 구성되어 있으며 이때 사용된 현미경 대물렌즈의 수치 구경은 0.85이다. 이때 공초점 현미경의 초평면 근처에 설치된 시료 표면으로부터 반사되어진 빛은 다시 반사형 공초점 현미경을 통해 sample arm의 종단으로 되돌아 들어가도록 정렬하였다. 한편, reference arm의 종단에는 GRIN 렌즈를 부착하여 광섬유를 통해 나오는 기준 광속을 평행광으로 만든 후, 집속용 렌즈를 이용하여 기준 거울면에 집속시켰다. 이 빛은 거울 면으로부터 반사된 후 다시 reference arm의 종단으로 재 입사된다. 이러한 구성을 사용하게 되면 기준 광속의 파면이나 기준 거울의 표면 상태에 민감하지 않은 간섭계를 구성할 수 있으며, 집속용 렌즈 또는 기준 거울의 위치를 이동하여 기준 광속의 세기 및 위상을 적절히 조절할 수도 있다. 최종적으로 시료에서 반사된 빛과 기준 거울에서 반사된 빛은 다시 광섬유 결합기에 의해 중첩되며, 결합기의 오른쪽 아래 단자에 연결된 검출기로 검출된다. 광섬유 단면에서의 반사를 줄이기 위하여 reference arm 쪽의 광섬유 단면에는 무반사 코팅된 GRIN 렌즈를 부착 사용하였으며, sample arm으로 사용된 광섬유의 단면은 글리세린(glycerine)을 이용하여 단면 반사를 줄였다.

제안된 방법으로 시료의 표면 형상을 검출하기 위해 시료 고정대는 xy 방향(광축에 수직한 방향)으로 이동 가능해야 하며, reference arm 쪽의 기준 거울은 축을 따라 이동 가능해야 한다. 또한, 제안된 방법외에 기존 방법들이 적용될 수 있도록 추가적으로 공초점 현미경의 구성요소인 현미경 대물렌즈와 시료 고정대를 z축 방향(광축 방향)으로 주사 가능하도록 장치를 구성하였다. 이때 각 구성 요소를 컴퓨터로 제어 가능한 PZT 방식의 translator를 사용하여 이동 혹은 주사하며, 최소 이동 간격은 대략 20 nm 정도이다.

3.2. 시료의 제작

표면 검색을 위해 두 가지 종류의 시료를 사용하였다. 첫

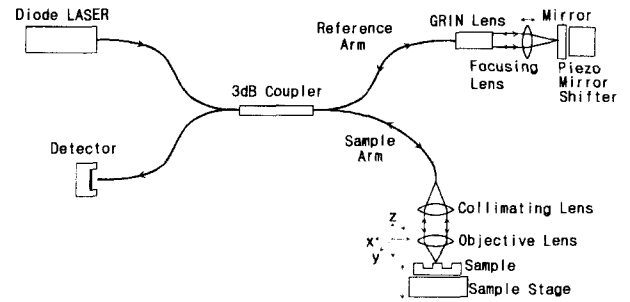


Fig. 2. Schematic diagram of a fiber-optical confocal scanning interference microscope.

번째 종류의 시료는 표면 전체가 균일한 반사율을 갖는 것으로서, 평평한 유리 기판 위를 전체적으로 알루미늄으로 증착한 후, 식각 공정에 의해 주기 20 μm 이고 폭 10 μm 인 격자를 형성한 다음, 알루미늄을 증착한 것이다. 제작된 시료의 두께를 α -step (KLA-Tencor사, alpha step-500)으로 측정된 결과 대략 100 nm 정도임을 알 수 있었다. 두 번째 시료는 표면의 반사율이 균일하지 않은 것으로서, LiNbO₃ 기판 위를 폭 10 μm 의 알루미늄 전극을 20 μm 주기로 증착한 표면탄성파(surface acoustic wave; SAW) 소자의 표면이다. 따라서 전극부분은 거울과 같은 반사율을 갖지만, 기판 표면은 약 4% 정도의 빛만을 반사하게 된다. 이 시료에서 α -step으로 측정된 전극 두께는 약 400 nm 정도였다.

3.3. 위상 변위법을 응용한 표면 형상 검색

위상 변위법을 응용하는 방식으로 시료의 표면 형상을 측정하기 위해 시료를 시료 고정대에 고정하고 기준 광속을 차단한다. 먼저, 현미경 대물렌즈를 종방향으로 주사하여 시료 표면의 한 점에 대한 종방향 특성 곡선을 측정한다. 측정된 종방향 특성 곡선으로부터 현미경 대물렌즈를 공초점 관계가 만족되는 z 축 좌표에 고정시킨다. 다시 기준 광속의 경로를 열어 시료로부터 반사된 빛과 기준 광속이 서로 간섭할 수 있도록 한다. 기준 거울을 적당한 위치에 고정 한 후, 시료의 전 영역을 xy 방향으로 주사하면서 각 점에서 간섭광의 세기를 측정한다. 이때 현미경 대물렌즈의 z축 좌표는 고정되어 있다. 이 과정이 끝난 후, 기준 거울을 원래의 위치에서 $\lambda/4$ 이동하고 시료 고정대를 xy 평면을 따라 다시 주사하면서 간섭광의 세기를 측정한다. 기준 거울의 위치를 순차적으로 $\lambda/4$ 씩 이동하며 위의 과정을 반복한다. 즉, 기준 광속의 위상이 0, $\pi/2$, π 인 세 가지 경우에 대해 모든 점에서의 간섭광 세기를 측정한다. 이때 각 점에 대해 측정된 세 가지 세기를 식(3)에 대입하여 시료로부터 반사된 빛의 진폭 및 위상을 결정한다. 위상의 결정과정에서 식(3)의 arctangent로부터 산출된 위상값은 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 구간으로 제한되므로 실제의 위상범위 0~ 2π 로 확장할 필요가 있다. 이러한 확장은 $\sin[\phi]$ 및 $\cos[\phi]$ 의 부호를 알면 쉽게 환산할 수 있는데, $I_C - I_B$ 와 $I_A - I_B$ 가 각각 $\sin[\phi]$, $\cos[\phi]$ 와 같은 값이므로 $I_C - I_B$ 와 $I_A - I_B$ 의 부호를 이용하여 ϕ 가 속한 구간을 결정할 수 있게된다. 또한 이렇게 결정된 위상은 0~ 2π 범위 내로 제한되므로 인접한 두 측정점의 위상차이가 2π 에 가까운 차이를 보이는 불연속이 나타나는 경우, 2π 를 가

감하는 위상 보정과정(phase unwrapping)을 거친 다음, 식(4)의 관계를 통해 시료의 높낮이를 결정하게 된다. 물론 이러한 보정과정은 시료의 표면형상이 연속적이라고 가정한 경우에 타당하게 된다.¹¹³⁾

비교를 위해 기존 방식 즉, axial response가 최대가 되는 z 축 좌표로부터 표면의 높이를 결정하는 방법을 병행하였다. 이 방법에서는 현미경 대물렌즈 대신에 시료를 종방향으로 주사해야 한다. 물론 시료 전체의 높낮이를 결정해야 하므로 시료는 종방향뿐만 아니라 xy 평면을 따라서도 주사되어야 한다. 먼저, 기준 광속을 차단하고 시료를 종방향으로 주사하면서 시료로부터 반사된 빛이 최대가 되는 지점을 찾는다. 즉 종방향 특성 곡선이 최대가 되는 z 좌표에 시료를 위치시킨다. 그런 다음, 기준 광속의 경로를 열어 간섭광의 세기가 최대가 되도록 기준 거울의 위치를 설정한다. 이때 시료로부터 반사된 빛과 기준 광속의 위상 차는 2π 의 정수배가 되므로 시료 표면 위의 한 점의 z 좌표는 간섭형 종방향 특성 곡선의 중앙 무늬가 최대가 되는 지점과 일치하게 된다. 이런 식으로 초기 정렬을 한 다음, 시료를 xy 방향으로 주사하면서, 시료 표면의 모든 점에 대해 동시에 시료를 종축 방향으로 주사한다. 이를 통해 모든 점에 대해 간섭형 종방향 특성 곡선을 구하며, 이로부터 중앙 무늬의 최대점 위치를 찾아 그 점의 표면 높이를 결정하게 된다.

IV. 측정결과 및 논의

4.1. 종방향 특성 곡선

먼저 구성된 광섬유 공초점 현미경 및 간섭 현미경의 특성을 파악하기 위해 시료 대신에 평면 거울을 사용하여 종방향 특성 곡선을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. 참고로 Fig. 2에 나타난 실험 장치도에서 기준 광속을 차단한 것이 바로 광섬유 공초점 현미경이 되며, 기준 광속과 시료로부터 반사된 빛이 간섭하는 경우가 광섬유 공초점 현미경이 된다. Fig. 3(a)는 대물렌즈 주사방식으로 측정된 광섬유 공초점 현미경의 종방향 특성 곡선으로서, 측정된 반치폭은 약 $6 \mu\text{m}$ 이다. 한편, Fig. 3(b)는 시료 주사방식에 의해 측정된 광섬유 공초점 간섭 현미경의 간섭형 종방향 특성 곡선으로서 중심 무늬의 반치폭은 약 $0.4 \mu\text{m}$ 으로서 간섭이 일어나지 않는 경우에 비해 반치폭이 0.067배 정도 축소되었음을 알 수 있다. 간섭에 의해 반치폭이 상당히 줄어들었지만, 중앙 무늬의 최대값과 인접한 무늬의 최대값이 5% 이내의 차이를 보이므로, 기존 방법에 의한 측정 과정은 잡음의 영향을 크게 받을 것으로 판단된다. 즉, 간섭형 종방향 특성 곡선을 이용하더라도 기존 방법인 최대값 검출 방법으로는 정밀한 시료 표면검색이 용이하지 않음을 알 수 있다.

두 종방향 특성 곡선의 모양이나 반치폭은 이론값과 다르고 비대칭적인 이유는 대물렌즈의 구면수차에 의한 영향으로 판단된다. 간섭형 종방향 특성 곡선은 역 푸리에 변환을 통하여 공초점 계의 complex pupil function을 산출할 수 있게 하므로 이러한 비대칭성은 사용된 대물렌즈의 수차 측정에 이용되기도 한다.¹¹⁴⁾

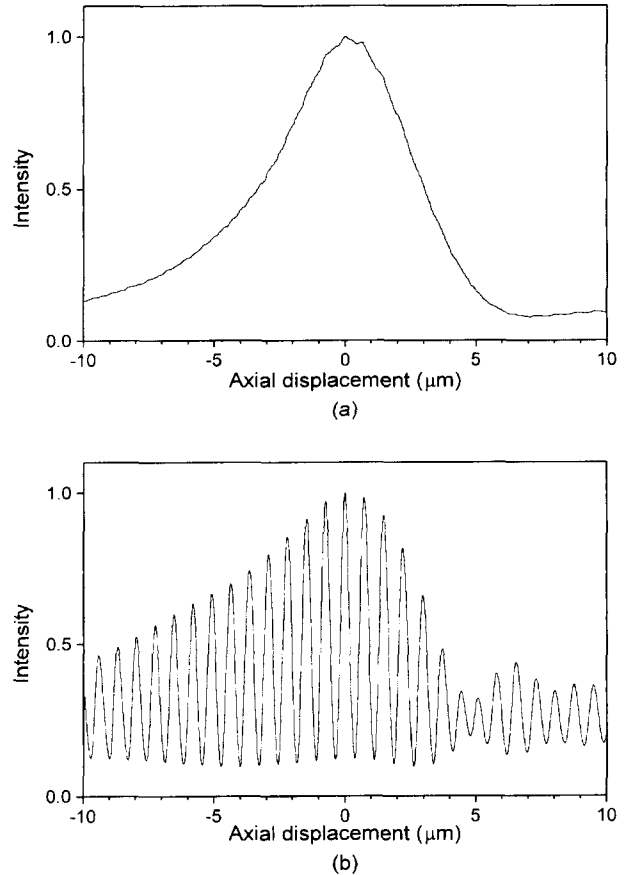


Fig. 3. Line profiles of the specimen with the uniform reflectivity measured by (a) the proposed method, (b) the conventional method and (c) the alpha step.

4.2. 표면 검색 결과

표면의 반사율이 균일한 시료에 대하여 표면을 일직선으로 주사하면서 측정된 표면의 높낮이를 Fig. 4에 나타내었다. 비교를 위해 제안된 방식과 기존 방법을 이용하여 시료의 동일한 표면을 측정하였다. Fig. 4(a)는 제안된 방법인 위상 변위법을 응용한 방식의 결과이고, Fig. 4(b)는 간섭형 종방향 특성 곡선의 최대값으로부터 높낮이를 결정한 경우이다. 두 경우 모두 100 nm 에 가까운 높낮이가 측정되었으며, 이는 α -step의 측정 결과와 대체로 일치하는 값이다. Fig. 4(c)에 α -step의 측정 결과를 보였다. 원리적으로 볼 때 기존 방법은 주사선상의 모든 위치에 대하여 공초점 관계가 만족되고 있는 extended focus image가 되므로 횡방향 분해능이 높다고 할 수 있다. 기존 방법에 비하여 위상 변위법을 응용한 방식의 결과가 다소 평탄화된 경향을 보이고 있지만, 사용된 FOCSSIM의 반치폭이 $6 \mu\text{m}$ 정도로 매우 넓으며, 시료의 높낮이 차이는 $0.1 \mu\text{m}$ 정도이므로 공초점 관계가 만족되지 않음에 따른 횡방향 분해능의 차이는 거의 없을 것으로 생각된다. 오히려 높이 결정 방법에 있어서 기존 방법의 종방향 분해능은 우리의 실험의 경우, 시료를 종방향으로 주사하는 z축 translator의 최소 이동 간격인 20 nm 에 의해 제한되기 때문인 것으로 판단된다.

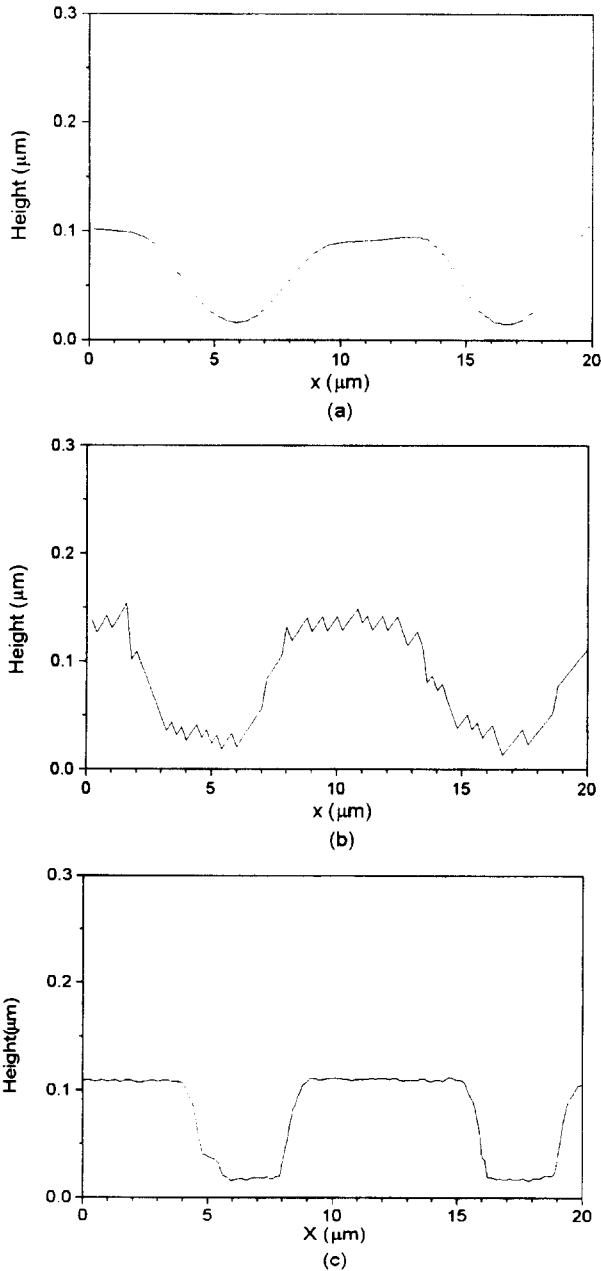


Fig. 4. Line profiles of the specimen with the uniform reflectivity measured by (a) the proposed method, (b) the conventional method and (c) the alpha step.

다음으로 표면의 반사율이 일정하지 않은 두 번째 시료 즉, SAW device의 표면을 일직선을 따라 주사하면서 높이를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에서 (a)는 위상 변위법을 응용한 방식의 결과이고 (b)는 기존 방법의 결과이다. Fig. 5(b)에서 실선은 간섭광의 세기가 최대가 되는 지점 즉, 기존 방식으로 결정한 표면의 높낮이이며, 점선은 최대 지점에서 간섭광의 세기를 나타내고 있다. 제안된 방식으로 측정된 결과는 Fig. 5(c)에 보인 α -step으로 측정된 400 nm와 일치하는 값을 가지며 전극의 간격 및 주기를 정확히 보여주고 있지만, 기존 방법의 결과로부터는 시료의 형상을 판단하는 것

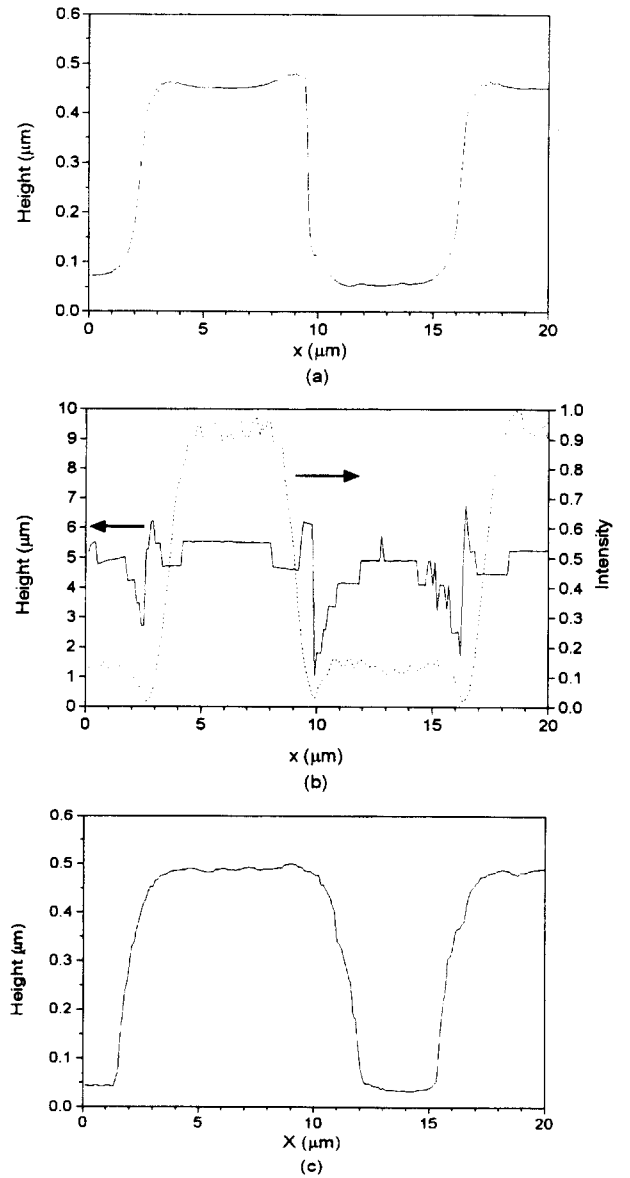


Fig. 5. Line profiles of the specimen with the non-uniform reflectivity measured by (a) the proposed method, (b) the conventional method. Dotted line means the peak intensity measured at the points on the scanning line and (c) the alpha step.

자체가 곤란하다.

기존 방법에서는 간섭형 종방향 특성 곡선이 최대가 되는 지점이 곧 중심 무늬의 최대 지점이라는 가정 하에서 높이를 결정하게 되는데, 이로 인해 시료의 반사율에 따라 높이 오차가 발생할 수 있을 것이다. Fig. 5(b)에서 점선으로 표시된 반사광 세기 변화와 결정된 형상을 비교해 보면, 반사율이 낮은 부분에서 많은 오차가 발생되었음을 볼 수 있다. 시료의 이러한 부분으로부터 반사된 빛과 기준 광속의 진폭이 큰 차이를 가지므로, 간섭형 종방향 특성 곡선 내의 각 간섭 무늬들은 거의 비슷한 최대값을 갖거나 잡음의 영향으로 인해 인접한 무늬가 중심 무늬보다 더 높은 최대값을 가질 수 있었을 것이

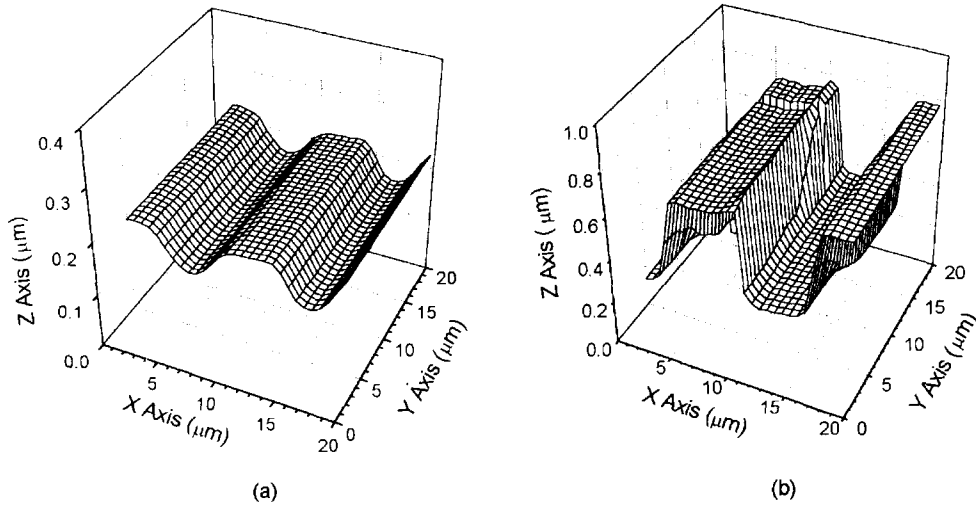


Fig. 6. Two-dimensional surface profile of two kinds of specimens measured by the proposed method. (a) the specimen with the uniform reflectivity and (b) the specimen with the uniform reflectivity.

다. 이로 인해, 결정된 표면의 높이는 원래의 높이에 비해 무늬의 간격, $\Delta z(\lambda/2 = 0.775 \text{ } \mu\text{m})$ 의 정수배 만큼 어긋난 값을 결정하게 될 것이다. 그림 5(b)의 실선으로 표현된 형상이 마치 계단 형태로 변화된 것도 이러한 이유로 설명될 수 있을 것이다. 반면에 위상 변위법을 응용하는 방식은 시료 표면에서 반사되는 빛의 위상으로부터 표면 높낮이를 결정하므로 기존 방식에 비해 반사를 변화에 대한 의존도가 상대적으로 낮을 것이다. 사실, 기존 방식의 문제점을 해결하기 위해 기준 광속의 세기를 시료 표면에서의 반사를 변화에 맞춰 조절하는 방법이나, 높은 NA의 대물렌즈를 사용하는 방법, 혹은 push-pull detection 방법 등이 제안된 바 있다.^[10]

지금까지의 표면 측정 실험에서 두 가지 방법의 주사 시간을 비교해 보면 위상 변위법을 응용한 방식에서는 주사선 상의 한 점에 대하여 3번의 측정이 이루어진 반면, 기존 방법의 경우는 공초점 현미경과 마찬가지로 종방향의 주사 과정이 필요하다. 본 실험에서처럼 주사선 상의 각 점에 대하여 시료를 종방향으로 20 nm 간격으로 100개의 z좌표에 걸쳐 주사 한다면, 위상 변위법을 응용한 방식에 비하여 약 30배 이상의 주사시간이 소요된다. 끝으로 위상 변위법을 응용한 방식으로 시료 표면의 2차원 표면 검색 결과를 Fig. 6(a)와 6(b)에 보였다. 그림 (a)는 시료 표면 반사율이 균일하고, 높낮이 차이가 100 nm인 경우의 결과이며, (b)는 전극 두께가 400 nm인 SAW device 표면을 검색한 결과이다. 표면검색결과를 얻는 과정에서는 phase unwrapping과정 외에는 특별한 조작을 추가하지 않았다.

V. 결 론

단일모드 광섬유와 광섬유 결합기를 이용하여 다양한 목적으로 활용될 수 있는 간결한 구조의 FOCSIM을 구성하였다. 시료 표면 검색 방법으로 위상 변위법을 적용함에 따라서 파장 1550 nm의 통신용 반도체 레이저를 광원으로 N.A. 0.85

의 대물렌즈를 사용하여 정밀한 시료 표면 검색이 가능함을 알 수 있었다. 이러한 방법은 종래의 시료 주사방식에 의한 간섭형 종방향 특성 곡선의 최대점 검출 방법과 비교할 때, 시료 표면검색에 소요되는 주사시간이 극적으로 단축됨은 물론 시료 표면 반사율에 따른 의존도를 감소시킬 수 있으며, 종방향 특성 곡선의 반치폭이 수 μm 정도로 넓은 경우에도 nm 단위의 종방향 분해능을 얻을 수 있으므로 비교적 긴 파장의 광원이나 낮은 N.A의 대물렌즈를 사용하는 경우에도 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 단순한 기준 광속의 위상 이동 방식을 사용함으로써 광원의 파장을 변조하는 방식에서 야기될 수 있는 비선형성의 문제도 회피할 수 있게된다. 제안된 FOCSIM은 대물렌즈 주사방식 및 시료 주사방식의 전환이 용이하도록 설계됨으로써 공초점 간섭 현미경뿐만 아니라 종래의 공초점 현미경, 대물렌즈 구면 수차 측정장치 등, 다양한 목적의 활용이 기대되며, 앞으로 광원의 파장을 짧게 하고, 광섬유의 core 직경을 줄이게되면 보다 향상된 분해능을 얻음으로써 반도체 시료의 표면 검색 등에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 기초과학 학술연구조성비(BSRI-98-2429)와 '96 학술진흥재단 자유공모과제(01 D 0711)의 지원을 받아 수행된 과제입니다. 두 기관의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. Wilson, *Confocal Microscopy* (Academic Press, London, 1990).
- [2] S. Kimura and T. Wilson, *Appl. Optics* **30**, 2143 (1991).
- [3] L. Giniunas, R. Juskaitis and S. V. Shatalin, *Electron. Lett.* **27**, 724 (1991).
- [4] R. Juskaitis and T. Wilson, *Optics Comm.* **92**, 315 (1992).
- [5] R. Juskaitis, F. Reinholz and T. Wilson, *Electron. Lett.* **28**,

- 986 (1992).
- [6] Min Gu, C. J. R. Sheppard and X. Gan, *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**(11), 1755 (1991).
- [7] D. K. Hamilton and C. J. R. Sheppard, *J. Appl. Phys.*, **60**, 2708-2712 (1986).
- [8] N. P. Rea, T. Wilson and R. Juskaitis, *Optics Comm.* **125**, 158 (1996).
- [9] Min Gu, *Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes*, (World Scientific, 1996).
- [10] C. J. R. Sheppard and Y. Gong, *Optik* **87**, 129 (1991).
- [11] K. Creath, *Progress in Optics*, Vol. XXVI, E. Wolf, Ed., 349. (Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988).
- [12] Poul M. F. Nielsen, Fred N. Reinholz and Paul G. Charette, *Opt. Eng.* **35**, 3084 (1996).
- [13] Daniel Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd Ed. 514. (A Wiley-Interscience Publication, 1992).
- [14] H. Zhou and C. J. R. Sheppard, *J. Modern Optics*, **44**, 1553 (1997).

Surface profiling by the phase shifting method in fiber-optical confocal scanning interference microscopes

Dae Chan Kim and Seung Gol Lee

Department of Electronic Materials and Devices, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

(Received March 17, 1999, Revised manuscript received May 12, 1999)

The fiber-optical confocal scanning interference microscope with a simple configuration was constructed with a 4-port fiber-optic coupler, and the new method based on the phase shifting method was proposed for surface profiling by the system. In the method, the height of a specimen was determined from the phase of confocal beam. It was verified experimentally that the method was applicable to even the confocal interference microscope with a long-wavelength source and a low NA objective, and that the scanning time could be drastically reduced compared with the conventional method. Finally, it was found that our method is less sensitive to the variation of surface reflectivity than the conventional method.