

◆특집◆ 대면적 미세형상의 초정밀 가공시스템

대면적 미세 형상의 측정/검사 시스템

김승우*, 김영식**

Measurement and Test System for Large-scale Object

Seung-Woo Kim*, Young-Sik Ghim**

Key Words : meso- (메조), moiré (모아레), multi-channel moiré (다중채널 모아레), white-light scanning interferometry (백색광 주사 간섭계), dispersive white-light interferometry (분산형 백색광 간섭계)

1. 서론

오늘날 선진국 경제의 산업적인 특성은 소위 전략제품의 대량 생산에의 의존도가 극도로 증대되고 있으며, 이의 국제적 경쟁력을 유지하기 위해 대규모의 투자자본과 기술 개발이 집약되고 있다. 지난 20 년간을 돌아켜 보면 반도체가 세계시장에서 가장 큰 규모의 전략제품군을 형성하였으며, 이의 급속적인 성장은 측정기술의 획기적인 발전을 유도하여 왔다. 반도체 생산에 요구되는 제반 측정기술들은 '초정밀'을 공동 특성으로 하고 있으며, 반도체의 최소선폭(critical dimension)의 감소와 더불어 원자단위의 측정분해능을 구현하게 되었다. 이제는 이에 대한 제반 측정기술이 나노 측정기술(nano-metrology)이라는 기술영역으로 지칭되고 있으며, 이러한 극초정밀 측정기술은 기존의 노광(lithography)을 근거로 한 반도체의 생산기술이 유지되는 한 이와 더불어 지속적인 발전을 할 것으로 예측된다.

최근 측정 기술의 새로운 영역으로 소위 '메조측

정기술' (meso-measurement)이 많은 주목을 받으며 부각되고 있다. 메조측정의 메조(meso-)는 접두사로서 '중간'이라는 의미를 갖는다. 이는 미세하 다의 마이크로(micro-)와 대형을 의미하는 마크로 (macro-)의 두 접두사의 중간영역을 지칭한다. 마이크로 측정은 일반적으로 마이크로톤 또는 그 이하 수준의 절대 정밀도를 구현하는 제반 측정기술을 통칭하며, 마크로 측정은 0.1 미터 이상의 측정범위에 0.1 밀리미터 수준의 정밀도를 구현하는 측정을 의미한다.

Measurement: Precision & Range

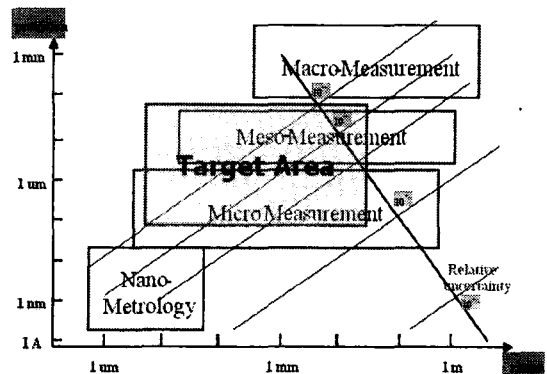


Fig. 1 Target area for large-scale object measurement

메조측정기술은 마이크로와 마크로 중간의 측정으

* 한국과학기술원 기계공학부
Tel. 042-869-3217, Fax. 042-869-5217
Email swk@kaist.ac.kr

정밀 측정 시스템 특히, 광 계측 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 한국과학기술원 기계공학부

로 1 ~ 10 마이크로 정도의 정밀도를 수십 밀리미터 이상의 측정영역에서 효과적인 측정기술을 의미한다. 현재 미세 형상(마이크로)과 대면적 측정(마크로)에 대한 개별적인 연구는 국내외에서 많이 이루어졌지만, 대면적 미세 형상 측정/검사기술(메조와 마이크로를 포괄하는 영역)에 대한 연구는 아직도 부족하다고 볼 수 있다.

따라서 대면적 미세 형상 측정/검사기술을 구현하기 위해서는 무엇보다도 메조측정 기술에 대한 원천기술 확보와 이를 마이크로 기술과의 연계시키는 과정이 필요하다.

2. 현 기술 수준

대면적 미세형상을 측정하기 위한 기술로는 공초점광학현미경(Confocal Optical Microscopy), 모아레(Moiré), 그리고 자동초점광학현미경(Auto-focus optical microscopy)을 대표적으로 들 수 있다. 이들의 측정 영역은 수십 마이크로에서 부터 수십 밀리미터에 걸쳐 있으며, 측정정밀도는 측정영역의 대략 1/1000에 해당된다. 현재 이들 기술은 제조산업제품 분야의 생산에 증가로 인해 연구 개발의 진행과 함께 성능이 개선되고 있다.

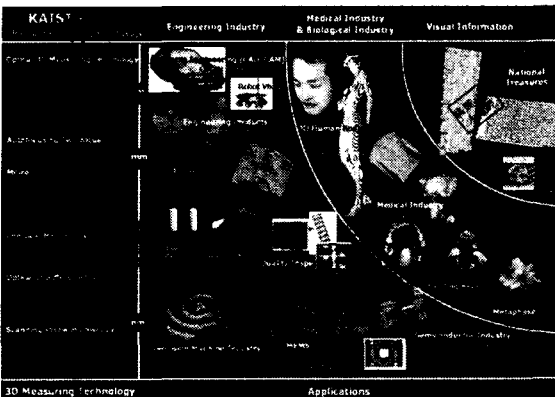


Fig. 2 Non-contact 3D measurement technology

그러나 이들 기술들의 공통적인 한계는 측정 깊이에 있어서 많은 제한을 갖고 있어 측정대상물이 수직에 가까운 경사가 급한 경우나 표면 반사가 경반사의 성질을 갖는 경우에도 여러 실제적인 제한점을 갖는다. 그리고 측정의 정밀도가 측정영역의 1/1000 정도에 미치고 있어

이에 대한 획기적인 개선이 요구되고 있다. 뿐만 아니라 산업적으로 측정 수요가 많은 LCD/PDP의 내부 검사나 다층 박막의 형상을 측정하기 위한 기술은 아직 제대로 확립되어 있지 않다. 그러나 최근에는 백색광(white light)을 이용한 주사간섭계의 개발로 측정의 깊이를 수 밀리미터까지 성공적으로 확장하였을 뿐만 아니라 다층 박막의 형상과 두께를 측정한 사례도 보고되고 있다. 그리고, 오랫동안 마크로 영역에서만 사용되어왔던 모아레 간섭 기술이 회로기판의 납형상을 측정하는 핵심 기술로 각광을 받고 있는 등 다양한 연구가 이루어지고 있다. 현재, 미세형상과 대면적을 측정하기 위한 개별적인 기술의 확보된 상태이다. 하지만 앞서 설명한 다층 박막 형상 측정기술이나 메조측정기술은 아직도 제대로 확립되어 있지 않아 이에 대한 연구가 많이 필요한 실정이다.

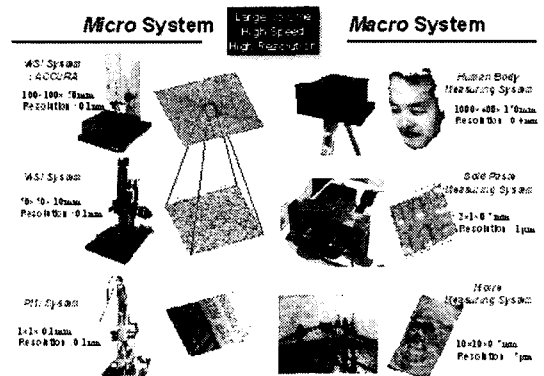


Fig. 3 Micro & Macro system for large-scale object measurement

따라서 대면적 미세 형상과 LCD/PDP나 다층 박막의 형상 측정을 위한 기술로 마이크로 영역과 마크로 영역에서 측정을 주로 해 왔던 백색광 간섭계와 모아레 간섭계를 각각 제한하고자 한다.

2.1 모아레

모아레란 단어는 프랑스인들이 고대 중국에서 수입된 비단 위에 나타나는 물결무늬를 지칭하는 말로, 현재는 두 개 이상의 주기적인 물결무늬가 겹쳐져 생기는 간섭무늬(interference fringe)를 의미

한다. 모아레 무늬는 주파수가 비슷한 두 개의 파동이 서로에게 영향을 미쳐 두 주파수의 차이에 따라 주파수 폭이 일정한 주기로 변하는 맥놀이 현상에 의해 생기는 것으로, 일정한 간격을 갖는 물체 사이에 발생하는 간섭무늬를 말한다. 모아레 현상을 이용한 3차원 측정법은 1970년 Meadows¹와 Takasaki²에 의해 그림자식 모아레 법이 처음 개발된 이후, 모아레 법의 장점인 측정영역대비 높은 측정 분해 능과, 빠른 측정속도를 이용하면서, 실제 구현에 있어서의 문제점인 간섭무늬해석의 제한 점, 낮은 수평방향으로의 측정 분해 능의 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 행해져 왔다. Yoshino³는 측정영역의 확대할 수 있는 영사식 모아레 법을 제안해서 그림자식 모아레 법의 단점이었던 측정을 위한 격자의 크기가 측정물의 크기보다 커야 하는 제한 점을 해결했으며, Kujawska⁴는 3차원형상정보를 포함하는 모아레 무늬 해석법으로, 광간섭계 무늬해석에 사용되는 위상 천이법을 적용함으로써, 팔목할 만한 측정 분해능 향상과 함께, 모아레 무늬 형태에 영향을 받지 않는 측정을 가능하게 했다. 그 후 광축에 대하여 수직으로 기계적으로 이송하여 여러 개의 위상 천이된 모아레 무늬를 획득하여 3차원 형상을 획득하는 영사식 모아레 법이 제안되었다.⁵ 상대적으로 높은 측정 분해능을 획득할 수 있지만, 기계적인 구동을 한 후 영상을 3개 이상 획득하므로, 측정시간이 수 초 이상이 되어 진동이 심한 환경에서의 측정이나 시간에 따라 움직이는 물체의 측정에는 적합하지 못하는 단점이 있다.

일반적으로 이웃하는 두 점 사이의 높이 단차가 모아레 무늬의 등가파장의 4분의 1 보다 넘게 되면 2π 모호성 문제가 발생하고 되고 이러한 문제는 오차를 유발하게 된다. 즉, 상대적으로 높은 단차를 가지는 물체의 경우 측정할 수 없게 된다. 이러한 방법을 해결하는 것은 먼저 모아레 무늬의 등가파장을 늘리는 방법인데, 이는 측정 분해능이 떨어지는 문제점이 발생한다. 이는 두 개의 격자를 이용한 이중파장 위상천이 모아레 방식을 적용하여 절대적인 모아레 차수를 구하여서 위 문제를 해결하였다.⁶ 서로 다른 피치의 두 개의 격자를 이용하여 모아레 무늬를 순차적으로 구한 후, 그 맥놀이(beatting) 파장을 구하여 절대 차수를 유도할 수 있다. 이러한 이중 파장 모아레 방식을 이용하면 단차가 큰 물체도 측정할 수 있다. 그러나,

앞서 언급한 바와 같이 기계적으로 격자를 이송해서 영상을 두 배 이상 획득해야 하므로 측정시간이 두 배 이상이 되고 전체 시스템 역시 더 커지는 단점이 존재한다. 앞서 언급한 위상천이 모아레 측정장치들은 위상 천이된 여러 개의 모아레 무늬를 얻기 위해 격자를 이송시키는 이송수단을 포함하고 있다. 따라서 이송수단을 통해 격자를 이송시키면서 여러 개의 모아레 무늬를 얻기 위해서는 이송수단을 제어하기 위한 제어수단이 필요하며, 이로 인해 측정부의 사이즈가 커지고, 유지보수가 어려우며, 측정장비가 고가로 되는 한편, 이동하는 물체의 측정은 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 한 번의 측정으로 3차원 정보를 획득하는 다중채널위상천이방식이 있다.

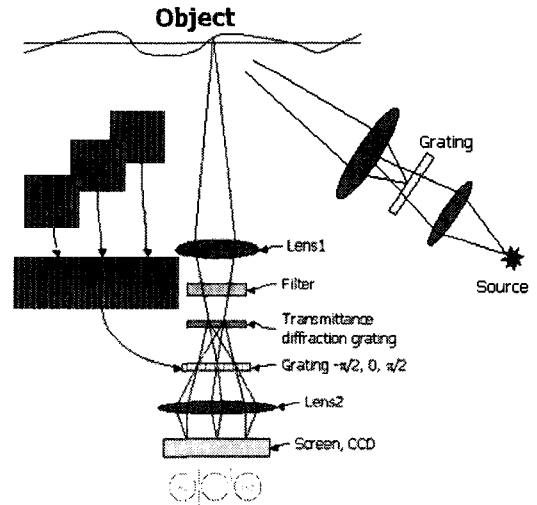


Fig. 4 Multi-channel moiré

주로 간섭계에 적용되어온 방식으로써 광을 3개 이상으로 다른 공간에 분할하여 세 개의 서로 다른 광경로차 혹은 위상차를 갖는 간섭무늬를 동시에 획득하는 방식이다.⁷ 다중채널을 적용하는 방식은 최초에는 여러 개의 광 분할기를 사용하여 간섭하는 두 개의 광들을 공간적으로 완전히 분할하여 상대적으로 다른 위상차를 준 후, 여러 개의 카메라에서 동시에 신호를 얻는 방법이 제시되었으나, 전체적으로 시스템이 커지고, 여러 개의 카

메라를 동기화해야 하는 어려움이 존재한다. 이러한 어려움을 제거하기 위해 여러 개의 광 분할기 대신 하나의 회절격자 혹은 홀로그램을 사용하여 단순히 하나의 카메라에서 공간적으로 분할된 신호를 동시에 얻는 방법이 제시되는 등⁸ 활발히 연구가 진행 중에 있다.

2.2 백색광 주사 간섭계

백색광 주사 간섭계는 백색광의 광범위한 주파수 영역으로 인해 짧은 가간섭거리를 활용해 미세 정밀부품의 삼차원 형상측정에 널리 응용되고 있다. 단색의 레이저 광원에 비해 가간섭거리가 수 마이크로미터(μm)로 한정되어 있어서 짧은 영역에서만 간섭무늬가 생성되므로 가시도 정점의 위치가 분명해진다. 이로 인하여 2π 모호성(ambiguity)의 문제점으로부터 자유롭게 된다. 또한 수백 마이크로(μm)의 크기의 형상도 나노미터(nm) 이하의 수직 분해능으로 측정할 뿐만 아니라 측정속도도 접촉식 측정기에 비해 빠르기 때문에, 최근 초정밀 형상측정에서 각광을 받고 있다. 백색광 주사간섭계의 기본원리는 다음과 같다.

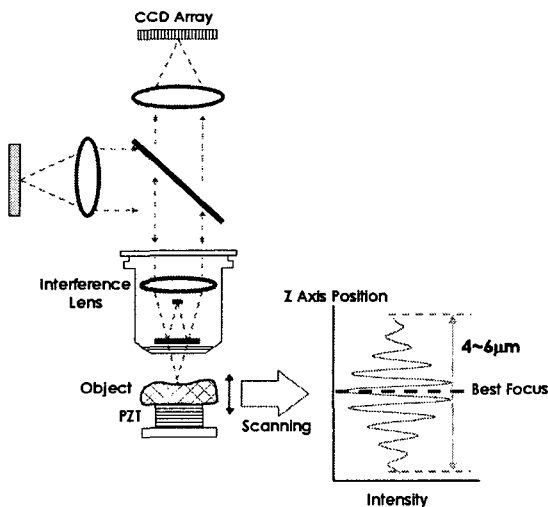


Fig. 5 white-light scanning interferometry

광축 방향으로 측정물체의 표면을 주사 이동시키면서 물체의 각 점에 대한 간섭 무늬를 얻는다. 그리고 얻은 간섭 무늬의 정점, 가시도 정점이나 위상 정점을 찾아 측정 물체에 대한 삼차원 정보를 얻어낸다. 이러한 백색광 주사간섭계는 차세대

의 주역이 될 MEMS, 마이크로시스템, 밀리구조물 등에 의한 다양한 신제품의 개발 추세로 인한 초정밀 표면의 검사를 요구하는 산업적 수요의 확대에 대응하여 널리 연구되고 있다. 백색광을 이용한 3 차원 형상 측정은 Balasubramanian⁹에 의해 처음 문서화된 이후 1987년 Davison¹⁰에 의해 “Coherence Probe Microscope”의 이름으로 제품화되어 소개되기도 했다. 이후 1990년에 Danielson¹¹, Lee¹², Kino¹³에 의해 각각 다른 측정 영역의 백색광 주사 간섭계가 발표되었다. 뿐만 아니라 국내에서도 백색광주사간섭계에 대한 중요성을 인식하여 다수의 논문이 발표되는 등 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁻¹⁷

앞서 설명한 바와 같이 백색광 주사 간섭계는 수백 마이크로미터(μm)에 이르는 단차를 나노미터(nm)이하의 고정밀도로 측정할 뿐만 아니라 측정속도도 빠르기 때문에 다른 측정기에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 하지만 백색광 주사 간섭계는 구동기의 구동 값이 측정 점의 높이를 결정하므로, 구동기의 오차가 그대로 측정오차가 되고 구동 범위에 의해 측정 영역이 제한을 받게 된다. 따라서 구동기의 구동 특성과 구동 범위가 백색광 주사 간섭계의 성능을 좌우하게 된다. 현재 백색광 주사 간섭계에서 구동기로 주로 사용되는 PZT(piezoelectric transducer)는 구동 범위가 수백 마이크로미터(μm)로 제한되어 있어서 수 밀리미터(mm)이상의 큰 단차를 측정하기에는 많은 문제점이 따르고 측정 중에 구동을 해야 하기 때문에 외부 진동에 매우 민감하게 된다. 따라서 이러한 백색광 주사 간섭계의 단점을 보완하고 측정 속도와 분해능을 높이면서 수 밀리미터(mm)이상의 단차까지도 측정해보고자 분산형 백색광 간섭계를 제안하고자 한다.

3. 분산형 백색광 간섭계

분산형 백색광 간섭계에 대한 연구는 1994년 J.Schwider와 Liang Zhou가 four-step grating에 대한 윤곽을 측정한 이래¹⁸, 1996년 U.Schnell¹⁹에 의한 다층 박막에 대한 표면 형상과 두께 측정이 보고되는 등 연구가 활발히 진행되고 있다. 분산형 백색광 간섭계는 분광 측정법(spectrometry)과 간섭 측정법(interferometry)을 접목한 방법으로 본 논문에서는 이러한 분산형 백색광 간섭계의 개념을 도

입하여 LCD 나 PDP 등의 다층 박막의 형상이나 두께 또는 미세 금형 표면 등의 대면적 미세 형상을 빠르고 정밀하게 측정해 보고자 한다²⁰.

분산형 백색광 간섭계는 기존의 광 간섭계와는 달리 별도의 이송 장치를 사용하지 않고 광의 스펙트럼을 분석하기 때문에 외부 진동에 강인할 뿐만 아니라 실시간 측정이 가능한 장점이 있다. 또한, 박막 두께 형상을 측정할 경우, 편광 광 분할기를 이용하여 박막의 형상과 두께 정보를 하드웨어적으로 각각 분리해 추출해 내기 때문에 동시에 측정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 분산형 백색광 간섭계는 측정 면과 기준 면과의 광 경로 차(Optical Path Difference)에 의해 발생하는 간섭 신호를 분광 측정법을 이용해 분석함으로써 측정 면에 대한 거리 정보를 얻는다. 본 논문에서는 이러한 분산형 백색광 간섭계의 원리와 편광 광 분할기를 이용하여 미세 박막의 두께와 형상을 실시간으로 측정해 보고자 한다. 분산형 백색광 간섭계에서 일반적으로 얻게 되는 신호는 Fig. 6 과 같고 수학적으로는 식 (1)과 같이 표현된다.

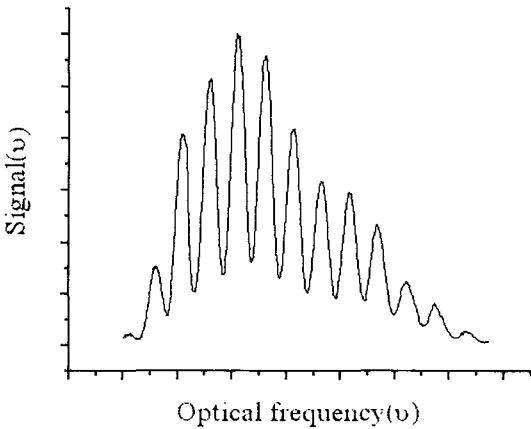


Fig. 6 A typical interference signal of dispersive white-light interferometry

$$\text{Signal} = A(\nu) + B(\nu)\cos\phi(\nu) \quad (1)$$

식 (1)에서 위상 정보인 $\phi(\nu) = \frac{2\pi}{\lambda} 2L\nu$ 로 주어지기 때문에 거리 정보 L 은 식 (2)와 같이 간단히 표현될 수 있다. 여기서 L은 거리정보, ν 는 주파수, c는 빛 속도를 나타낸다.

$$L = \frac{c}{4\pi} \frac{d\phi}{d\nu} \quad (2)$$

따라서 거리 정보 L 을 이용하면, 임의의 박막을 측정 시편으로 삼았을 경우, 박막의 두께 형상을 손쉽게 구할 수 있게 된다. 시스템의 구성도는 Fig. 7 과 같다.

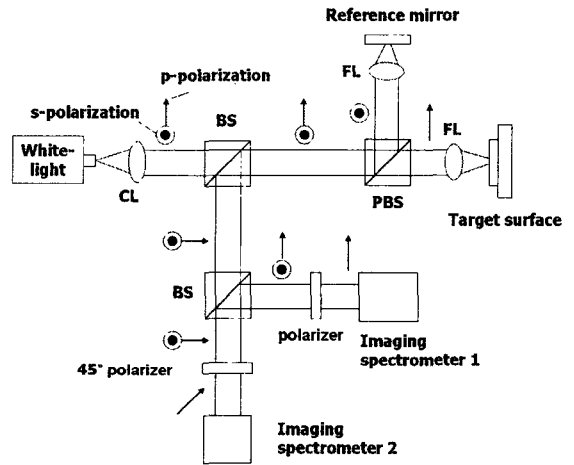


Fig. 7 Dispersive white-light interferometry for thickness profile measurement; CL : collimating lens, BS : beam splitter, PBS : polarizing beam splitter, FL : focusing lens.

Fig. 7 에서 보는 바와 같이 광원으로는 400-700 nm 의 광 대역폭의 백색광을 사용하고, 이를 각각 측정 시편(Target surface)과 기준 면(Reference mirror)에 편광 광 분할기(PBS)를 이용해 p 파와 s 파로 분리해 조사를 한다. 박막에 입사된 p 파는 박막의 상층부와 하층부에서 각각 반사되어 간섭 신호 (self-interference signal) 를 형성하고 이를 Imaging spectrometer 1 에서 주파수 별로 분리해 바라보게 된다. 또한 별도의 기준 면(Reference mirror)을 두어 박막과 직접 간섭시켜 기준 면에 대한 박막의 간섭 신호를 imaging spectrometer 2 에서 주파수 별로 분석을 한다. 즉, imaging spectrometer 1 에서는 박막 내부에서 형성된 간섭 신호(박막 두께 정보가 포함되어 있음)를 바라보게 되고, imaging spectrometer 2 에서는 기준면과 박막에서 각각 반사되어 형성된 간섭 신호(박막 형

상 정보가 실려 있음)를 바라보게 된다. 이를 통해 박막의 두께 형상을 실시간으로 측정할 수 있게 되는 것이다. 본 논문에서 제시하는 편광 분리 분산형 백색광 간섭계를 이용해 임의의 투명 박막을 측정한 결과는 다음과 같다.

Imaging spectrometer 1 과 imaging spectrometer 2 에서 얻게 되는 간섭 신호는 각각 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같고 이를 분석하면 두께 (6.921 μm)와 형상 (18.172 μm)을 구할 수 있다.

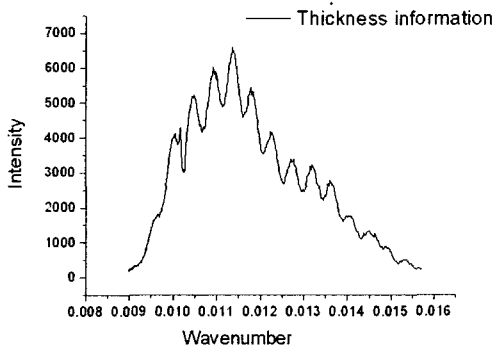


Fig. 8 A self-interference signal image of one point of dispersive white-light interferometry for thickness measurement

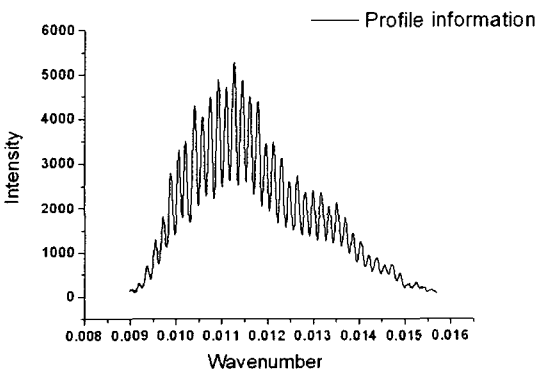


Fig. 9 An interference signal of one point of dispersive white-light interferometry for profile measurement

현재 분산형 백색광 간섭계를 이용해 다층 박막의 두께 형상 또는 대면적 미세 형상을 측

정하는 연구는 아직 개발 단계에 있으며 향후 지속적인 연구가 필요하고, 산업적으로 측정 수요가 많은 LCD/PDP 의 내부 검사나 다층 박막의 형상을 측정하는 쪽으로 응용되면 파급효과가 클 것으로 예상된다.

4. 결론

대면적 미세 형상 측정에 포함되는 측정 기술은 측정영역에 따른 분류에 의하면 마이크로 측정기술과 메조 측정기술이 포함된다. 마이크로 측정기술은 1 마이크로 이하의 미세 형상의 정밀한 측정에 사용되며 대표적인 기술로는 백색광 주사 간섭계가 있고, 메조 측정기술은 수 마이크로미터에서 수 밀리미터의 형상을 고속으로 측정할 때 쓰이며, 모아레 방식을 대표적으로 들 수 있다. 현재 이들 기술에 대한 개별적인 연구는 많이 이루어져 있지만, 마이크로 영역과 메조 영역을 포괄하는 대면적 미세 형상에 대한 측정 기술의 개발은 미진한 실정이다. 따라서, 각각의 기술에 대한 측정 영역 및 정밀도를 향상시키는 것이 무엇보다 중요하다. 특히, 백색광 주사 간섭계의 응용 기술로 각광 받고 있는 분산형 백색광 간섭계는 미세 표면을 나노미터이하의 정밀도로 측정할 수 있으며, 측정의 깊이를 수 밀리미터(mm)까지 확장하여 측정할 수 있기 때문에 대면적 미세 형상 측정/검사 기술로 주목을 받고 있다. 뿐만 아니라 LCD 나 PDP 의 평판 디스플레이 산업 등에서 요구되고 있는 다층 박막 두께 형상 측정까지도 가능하여 차세대 기술로 떠오르고 있을 뿐만 아니라 향후 응용 범위 또한 매우 커질 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Meadows, D. M., Johnson, W. O., Allen, J. B., "Generation of surface contours by moiré patterns," Applied Optics, Vol. 9, No. 4, pp. 942 - 947, 1970.
2. Takasaki, H., "Moiré topography," Applied Optics, Vol. 9, No. 6, pp. 1467 - 1472, 1970.
3. Yoshino, H., "Moiré topography by means of a grating Hologram," Applied Optics, Vol. 15, No. 10, pp. 2414 - 2417, 1976.
4. Kujawska, M., "Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moiré interferometry," Applied

- Optics, Vol. 26, No.22, pp. 4712 – 4714.
5. Choi, Y. B., Kim, S. W., "Phase-shifting grating projection moiré topography," Optical Engineering, Vol. 37, No.3, pp. 1005 - 1010, 1998.
 6. Kim, S. W., Oh, J. T., Jung, M. S., Choi, Y. B., "Two frequency phase-shifting projection moiré topography," Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol. 3520, pp. 36 - 42.
 7. Kwon, O., "Multi-channel phase-shifted interferometer," Optics letter, Vol. 9, No.2, pp. 59 - 61, 1990.
 8. Hettwer, A., Kranz, J., Schwider, J., "Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating," Optical Engineering, Vol. 39, No.4, pp. 960 - 966, 1990.
 9. Balasubramanian, "Optical system for surface topography measurement," US patent #4,340,306, 1982.
 10. Davidson, M., Kaufman, K., Mazor, I. and Cohen, F., "An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 775, pp. 233-247, 1987.
 11. Danielson, B. L., Boisrobert, C. Y., "Absolute optical ranging using low coherence interferometry," Applied Optics, Vol. 30, No. 21, pp. 2975-2979, 1991
 12. Lee, B. S., Strand, T. C., "Profilometry with a coherence scanning microscope," Applied Optics, Vol. 29, No. 26, pp. 3784-3788, 1990.
 13. Kino, G., Chim, S., "Mirau correlation microscope," Applied optics, Vol. 29, No. 26, pp. 3775-3783, 1990.
 14. Park, M. C., Kim, S. W., "Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white-light scanning interferograms," Optical Engineering, Vol. 39, No. 4, pp. 952-959, 2000.
 15. Park, M. C., Kim, S. W., "Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement," Optics Letters, Vol. 26, No. 7, pp. 420-422, 2001.
 16. Ghim, Y. S., Kim, S.W., "Phase change on reflection in a white-light interferometer as polarization is changed," J. Opt. Soc. Korea, Vol. 15, No. 4, pp. 331-336, 2004.
 17. Kim, S. W. and Kim, G. H., "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry," Applied Optics, Vol. 378, No. 28, pp. 5968-5973, 1999.
 18. Schwider, J., Zhou, Liang, "Dispersive interferometric profilometer," Optics Letters, Vol. 19, No. 13, pp. 995-997, 1994.
 19. Schnell, U., Dandliker, R., Gray, S., "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," Optics Letters, Vol. 21, No. 7, pp. 528-530, 1996.
 20. Kim, S. W., Ghim, Y. S., "Low-coherence interferometry for 3D measurements of microelectronics packaging and integration," Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol. 5644, pp.429-443 , 2005.