

편광분리 분산형 백색광 간섭계를 이용한 박막두께형상측정법

김영식*, 김승우(KAIST)

Dispersive white-light interferometry using polarization of light for thin-film thickness profile measurement

Y. S. Ghim, S. W. Kim (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

We describe a new scheme of dispersive white-light interferometer that is capable of measuring the thickness profile of thin-film layers, for which not only the top surface height profile but also the film thickness of the target surface should be measured at the same time. The interferometer is found useful particularly for *in-situ* inspection of micro-engineered surfaces such as liquid crystal displays, which requires for high-speed implementation of 3-D surface metrology.

Key Words : dispersive white-light interferometer(분산형 백색광 간섭계), 3-D surface profile measurement (삼차원표면형상측정), thin-film thickness profile measurement (박막두께형상측정), polarization (편광)

1. 서론

초정밀 삼차원 측정은 빠르게 성장하고 있는 통신과 디스플레이산업에서 미세 광전자 부품 등의 설계, 제조, 그리고 조립에 이르기까지 거의 전 공정에서 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 광전자부품들의 일반적인 형상 특징은 품질 관리를 위해 요구되는 측정 단위가 빛의 파장인 수백 나노미터(nm)에서 수십 밀리미터(mm)에 이른다. 특히, 수십 밀리미터의 상대적으로 큰 크기에 요구되는 측정 정밀도는 보통 빛의 파장크기이거나 심지어는 나노미터이하로 내려가기도 한다. 현재, 단색광원을 쓰고 있는 표면형상측정방법은 이웃하는 두 점 사이의 높이 단차가 광원의 파장의 4분의 1 보다 넘게 되면 2π 모호성(ambiguity)이 발생하여 측정 범위에 제한을 받게 되는 단점이 존재한다. 이러한 문제를 극복하고자 지난 20 여년 동안, 백색광 주사 간섭계^[1,2]에 대한 연구가 진행되었다. 백색광 주사 간섭계는 백색광의 광범위한 주파수 영역으로 인해 가깝거리가 수 마이크로미터(μm)로 한정되어 있어 짧은 영역에서만 간섭무늬가 생성되므로 가시도 정점의 위치가 분명해 진다. 이로 인하여 2π 모호성의 문제점으로부터 자유롭게 되어 수백 마이크로의 크기의 형상도 나노미터이하의 높은 수직 분해능으로

측정하기 때문에 최근 초정밀 형상측정에서 각광을 받고 있다. 하지만 적용 범위가 다중 반사가 일어나지 않는 불투명 물체에만 한정되고 기계적인 구동을 필요로 하기 때문에 실시간 측정이 안되고 외부 진동에 약한 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제점 중 투명한 박막이 도포된 미세 구조물에 대한 측정을 시도한 연구 결과들이 보고 되어 많은 주목을 받고 있다.^[3,4]

본 논문에서 제시하는 분산형 백색광 간섭계는 앞서 언급한 연구의 연장선상에 있으며 더 나아가 백색광 주사 간섭계에서의 기계적인 구동부 대신에 분광장치를 사용함으로써, 실시간 측정이 가능하고 외부 진동에 강인하게 된다.

2. 분산형 백색광 간섭계

분산형 백색광 간섭계에 대한 연구는 1994 년 J.Schwider 와 Liang Zhou 가 four-step grating 에 대한 윤곽을 측정한 이래^[5], 1996 년 U.Schnell 에 의한 다층 박막에 대한 표면 형상과 두께 측정이 보고 되는 등 연구가 활발히 진행되고 있다.^[6-8] 분산형 백색광 간섭계는 분광 측정법(spectrometry)과 간섭 측정법(interferometry)을 접목한 방법으로 본 논문에서는 이러한 분산형 백색광 간섭계의 개념을 도입하

여 LCD 나 PDP 등의 다층 박막의 두께 형상을 빠르고 정밀하게 측정해 보고자 한다. 분산형 백색광 간섭계는 기존의 광 간섭계와는 달리 별도의 이송장치를 사용하지 않고 광의 스펙트럼을 분석하기 때문에 외부 진동에 강인할 뿐만 아니라 실시간 측정이 가능한 장점이 있다.

본 논문에서는 새로운 개념의 분산형 백색광 간섭계를 Fig. 1에서 제안하고자 한다.

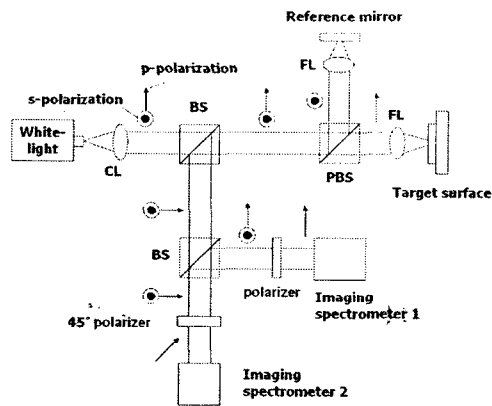


Fig. 1 Dispersive white-light interferometry for thickness profile measurement; CL : collimating lens, BS : beam splitter, PBS : polarizing beam splitter, FL : focusing lens.

본 간섭계는 측정하고자 하는 박막의 두께 정보와 표면 형상 정보를 하드웨어적으로 분리하여 실시간으로 두께형상정보를 측정하도록 구성되어 있다. 분산형 백색광 간섭계는 측정면과 기준면과의 광경로차(Optical Path Difference)에 의해 발생하는 간섭 신호를 분광 측정법을 이용해 분석함으로써 측정면에 대한 거리 정보를 얻는다. 이때, 측정면에 대한 거리 정보에는 박막의 두께 정보와 형상 정보가 동시에 실려 있게 되는데, 이를 편광 광 분할기를 이용하여 박막의 두께 정보와 형상 정보를 실시간으로 분리해 측정하게 된다.

백색광은 콜리메이팅 렌즈(CL)와 광분할기(BS)를 통과해 평행광이 되어 편광 광분할기(PBS)에 입사된다. 이때, 백색광의 수직, 수평 편광된 빛은 각각 분리되어 측정면(Target surface)과 기준면(Reference mirror)에 입사되게 된다. 측정면에 입사된 빛은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 투명한 박막의 상층부와 하층부에서 각각 반사되어 간섭광을 만든다. 이때, 박막의 두께에 의해 형성된 간섭 신호는 수평 편광 성분만 있다.

그리고 기준면에 의해 반사된 빛은 수직 편광 성분만 있다. 이 두 빛이 편광 광분할기를 통해 다시 광분할기에 들어가고 반사된 빛은 광분할기에 각각

반사/투과되어 imaging spectrometer1 과 imaging spectrometer2에 입사된다.

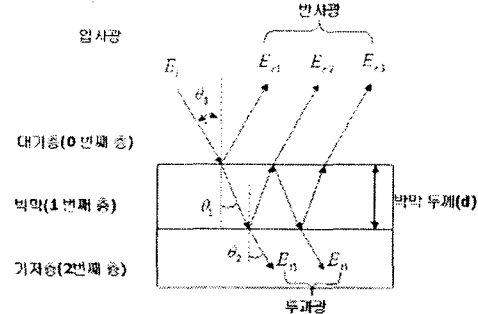


Fig. 2 Reflection and Transmission of a plane wave in a thin-film structure

Imaging spectrometer1에는 수평 편광 장치(Polarizer)가 있어 수평 편광만 통과시켜 분광을 한다. 마찬가지로 imaging spectrometer2에서는 45도 편광기를 설치하여 수평 편광된 빛과 수직 편광된 빛을 서로 간섭시켜 기준면에 대한 측정면의 거리 정보, 즉 형상 정보를 분광을 시켜 얻게 된다

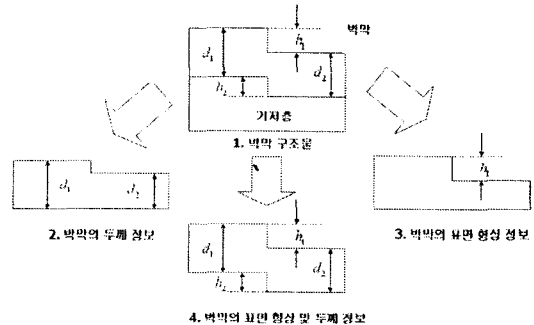


Fig. 3 Measuring Procedure (1) actual profile (2) thickness measured by imaging spectrometer1 (3) surface profile measured by imaging spectrometer2 (4) thickness profile combined thickness and surface profile

즉 Fig.3에서 보는 바와 같이 실제 박막 구조물을 측정했을 경우, imaging spectrometer1에서는 박막의 두께 정보만을 추출해 내고, imaging spectrometer2에서는 박막의 표면 형상 정보만을 추출해 내기 때문에 이들 두 정보를 박막의 표면 형상 및 두께 정보를 뽑아낼 수 있는 것이다. 여기서, imaging spectrometer1과 2는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 입사된 광 중에서 한 라인만을 슬릿(slit)으로 자른 다음 이를 분광장치를 이용해 2차원 Detector Array에 x 축은 한 라인에 대한 위치 정보, y 축은 파장 별 분광정보를 나타내게 된다. 즉, 한 라인에 대한 분광 별 파장정보를 얻게

되는 것이다.

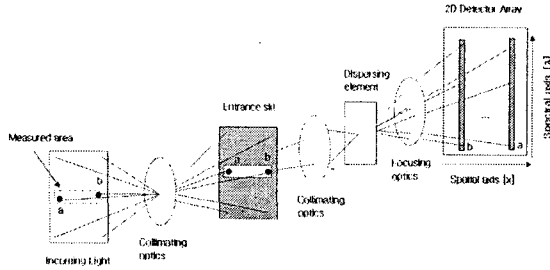


Fig. 4 Schematic diagram of the imaging spectrometer

일반적으로 분산형 백색광 주사 간섭계에서 얻게 되는 신호는 Fig.5 와 같고 수학적으로는 식 (1)과 같이 표현된다.

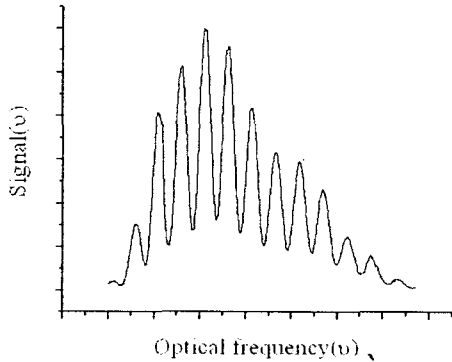


Fig. 5 A typical interference signal of dispersive white-light interferometry

$$s(v) = a(v) + b(v)\cos\phi(v) \quad \text{식 (1)}$$

여기서, $a(v)$, $b(v)$ 는 각각 배경 광과 modulation 신호를 나타내고 위상 $\phi(v)$ 는 식 (2)로 주어진다.

$$\phi(v) = \frac{2\pi}{c} 2Lv + \delta \quad \text{식 (2)}$$

여기서 v 는 주파수, c 는 빛 속도, L 은 박막 두께와 형상에 관련된 광경로차(Optical Path Difference)로 imaging spectrometer 1에서는 박막의 두께를 나타내고 imaging spectrometer2에서는 박막을 형상을 나타낸다. 그리고, δ 는 박막에 입사된 빛이 다중 반사에 의한 겪게 된 위상 변화 량을 나타낸다.

실제 δ 에 의한 영향은 거의 무시될 정도로 작기 때문에 보통 단층의 박막일 경우에는 식 (2)는 식 (3)으로 간단히 표현될 수 있다.

$$\phi(v) \approx \frac{2\pi}{c} 2Lv \quad \text{식 (3)}$$

식 (1)에서 위상 $\phi(v)$ 는 다음과 같은 방법으로 쉽게 구할 수 있다.¹⁹⁾

$$\begin{aligned} s(v) &= a(v) + \frac{1}{2}b(v)\left(e^{i\phi(v)} + e^{-i\phi(v)}\right) \\ &= a(v) + \frac{1}{2}b(v)\left(e^{i2v\frac{2\pi}{c}L} + e^{-i2v\frac{2\pi}{c}L}\right) \end{aligned} \quad \text{식 (4)}$$

식 (4)를 FFT(Fast Fourier Transform)하면 식 (5)와 같다.

$$S(f_v) = A(f_v) + \frac{1}{2}B\left(f_v - \frac{2\pi}{c}L\right) + \frac{1}{2}B\left(f_v + \frac{2\pi}{c}L\right) \quad \text{식 (5)}$$

식 (5)에서 두 번째 부분만 남기고 나머지를 filtering 한 후에 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 수행하면 식 (6)이 되고 여기서 위상 ϕ 는 식 (7)에서와 같이 추출해 낼 수 있다.

$$b(v)e^{-i\phi(v)} = b(v)e^{-i2v\frac{2\pi}{c}L} \quad \text{식 (6)}$$

$$\log\left[b(v)e^{-i\phi(v)}\right] = \log b(v) - i\phi(v) = \log b(v) - i\left(2v\frac{2\pi}{c}L\right) \quad \text{식 (7)}$$

여기서, 위상 ϕ 는 식 (7)에서 허수가 되므로 식 (8)에서 광경로차 L 을 구할 수 있다.

$$L = \frac{c}{4\pi} \frac{d\phi(v)}{dv} \quad \text{식 (8)}$$

3. 실험결과 및 분석

지금까지 분산형 백색광 간섭계의 기본 원리와 개념, 그리고 이를 응용해 박막의 두께 형상을 실시간으로 측정하는 방법에 대해서 논의하였다. 유리 기판 위에 투명한 PR이 도포된 경우에 본 논문에서 제안된 간섭계를 이용해 측정물체의 한 라인에 대한 두께와 형상을 각각 얻어 보았다. Fig. 6과 7은 imaging spectrometer 1과 2에서 각각 얻은 640×480 픽셀의 광 분광 정보 이미지 신호이고 이를 식 (7)을 이용해 두께와 형상 값을 각각 구해 나타내 보면 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

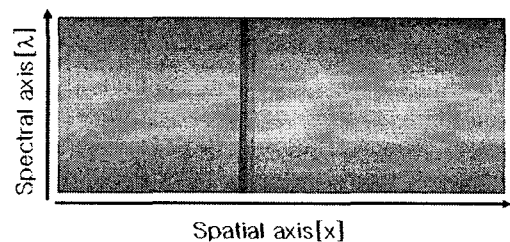


Fig. 6 A self-interference signal image of one line of dispersive white-light interferometry for thickness measurement

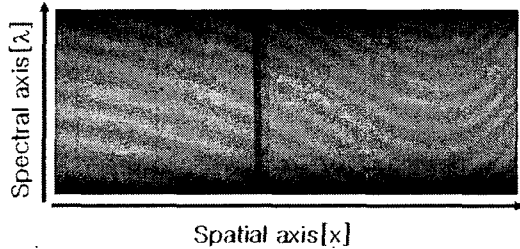


Fig. 7 An interference signal image of one line of dispersive white-light interferometry for profile measurement

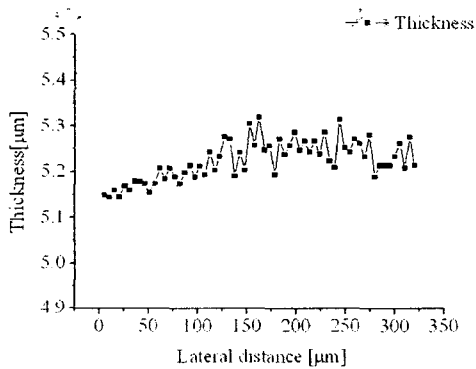


Fig. 8 Thickness measurement result analyzing a self-interference signal image of one line

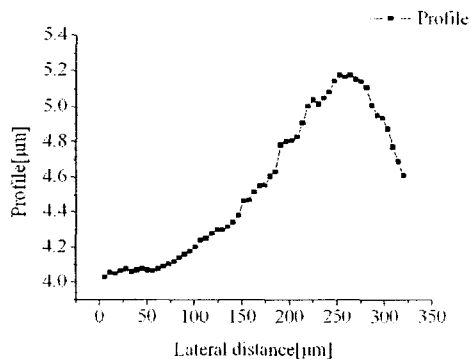


Fig. 9 Profile measurement result analyzing an interference signal image of one line

4. 결론

본 논문에서는 박막의 두께 형상을 실시간으로 측정하기 위한 방법으로 편광을 이용한 분산형 백색광 주사 간섭계를 제안하고 기초 실험을 해 보았다. 본 방법은 외부 진동에 강인하고, 한번에 측정 물체의 한 라인을 실시간으로 잴 수 있는 장점이 있다. 이러한 분산형 백색광 간섭계는 향후 LCD 나 PDP 의 평판 디스플레이 산업 등에서 요구되고 있는 다층 박막 두께의 형상 측정이 가능하기 때문에 차세대 기술로 떠오르고 있을 뿐만 아니라 향후 응용 범위 또한 매우 커질 것으로 예상된다.

참고문헌

1. P. de Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency," *J. Mod. Opt.* 42(2), p.389-401(1995).
2. S. W. Kim and Y. S. Ghim, "Low coherence interferometry for 3-D measurements of microelectronics packaging and integration", *Proc. Of SPIE Vol. 5644*, p. 429-443(2004)
3. S. W. Kim and G. H. Kim, "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry", *Appl. Opt.* 38(28), p. 5968-5973(1999)
4. Daesuk Kim and Soohyun Kim, H.J. Kim, Yunwoo Lee, "Measurement of the thickness profile of a transparent thin-film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter", *Opt. Lett.* 27(21), p. 1893-1895(2002)
5. J. Schwider and Liang Zhou, "Dispersive interferometric profilometer," *Opt. Lett.* 19(13), p.995-997(1994)
6. U Schell, E Zimmermann and R Dandliker, "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channelled spectrum interferometry," *Pure Appl. Opt.* 4(5), p.643-651(1995)
7. U. Schell and R. Dandliker, "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," *Opt. Lett.* 21(7), p.528-530(1996)
8. Santiago Costantino, Oscar E. Martinez and Jorge R. Torga, "Wide band interferometry for thickness measurement," *Optics Express* 11(8), p.952-957(2003)
9. Mitsuho Takeda, Hideki Ina and Seiji Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* 72(1), p.156-160(1982)