

◆특집◆ 나노테크놀로지와 정밀공학

나노메트롤로지의 기술동향

엄태봉*, 박병천*, 김재완*, 엄천일*

Technical Trends of Nanometrology

Tae Bong Eom*, Byung Chon Park*, Jae Wan Kim*, and Cheon Il Eom*

Key Words : Nanometrology (나노측정학), Laser interferometer (레이저간섭계), Atomic force microscope (원자력간현미경), Probe (탐침), X-ray interferometer (엑스선간섭계), Fabry-Perot interferometer (패브리페로간섭계)

1. 서론

Nanotechnology 가 나노미터(nano-meter) 수준의 크기 또는 변위를 제어하는 기술이라면, nanometrology 는 그 양들을 관측하고 다룰 수 있는 자(rule)와 측정기를 제공하는 기술이라 할 수 있다. 그 대상은 고집적 반도체 소자의 sub-100 nm 회로 선폭이 될 수도 있고, 나노튜브(nanotube) 또는 quantum dot 과 같은 나노 구조물이 될 수도 있으며, 심지어 분자 그 자체가 될 수도 있다. 또한 정밀 비구면 제작과 같이 물체의 크기는 크지만, 그 측정 정확도를 수십 nm 수준으로 측정해야 할 때도 있다.

모든 가공기술이 그렇듯이 정밀한 가공을 위해서는 가공부품에 대한 체계적인 측정이 필수적이다. 특히 양산 단계에 있어서 측정기술은 가공의 기반이 된다 할 수 있다. 이러한 특성 때문에 측정기술은 가공기술의 발달과 함께 꾸준한 진보가 이루어졌다. 현재 실험실 수준에서 연구가 진행되고 있는 나노 리소그래피 기술, 원자 및 분자 제어기술이 실용화되어 생산에 적용될 경우 nanometrology 기술 없이는 구현될 수 없다. 현재 nanotechnology 에 대한 대부분의 연구가 단일 소

자 수준이기 때문에 SEM(scanning electron microscope)이나 AFM(atomic force microscope) 등으로 관측하는 것만으로도 제작이 가능하나 집적화될 경우 정량화 된 치수 제어가 필요하다. 이러한 현상은 AFM 에서 확인할 수 있다. 즉 기존의 AFM 은 시료의 표면 일부에 대한 관찰에만 적용되었는데 이 AFM 에 metrological frame 을 부착시켜 관측의 수준을 벗어나 시료의 형상을 직접 측정하는 추세로 개발이 진행되고 있다. Nanometrology 기술은 nanotechnology 기술이 실제 생산 현장에 적용될 경우 공정장비의 핵심구성요소로 사용될 뿐 아니라 모든 공정을 제어하기 위한 수단으로 nanotechnology 의 핵심 요소 기술이다. 따라서 나노측정의 기반기술을 확보하여 나노미터 수준의 측정기 개발이나 나노 리소그래피 등 나노기술 개발의 기초를 마련할 필요가 있다. 표 1 은 2000 년도 미국 Sematech 에서 발행한 "The National Technology Roadmap for semiconductors"에서 발췌한 것으로 향후 필요한 metrology 요구 수준을 나타낸 것이다. 집적화와 함께 측정 또한 매우 빠르게 발전하고 있는데 향후 3,4 년 뒤에 필요한 측정기술을 확보하지 못한 실정이다. 현재 기존 측정 tool 에서 새로운 tool 로 변화되는 과정이다.

현재 급속하게 발전되고 있는 나노기술이 시작단계에 있는 것과 마찬가지로 나노측정기술 또한 걸음마 수준이기 때문에 이 분야에 관한 선

* 한국표준과학연구원 광기술표준부
Tel. 042-868-5100, Fax. 042-868-5608
Email tbeom@kriss.re.kr
초정밀측정기술 및 측정시스템 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

진국과의 기술격차가 거의 없는 실정이다. 따라서 우리가 발 빠르게 대응하여 기술을 개발할 경우 차세대 기술인 나노기술에 기여할 수 있을 뿐 아니라 거의 전무한 정밀 측정기 시장에 진입할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 1 반도체 제조공정에서의 측정 요구수준

	2000 년		2008 년	
	현장 요구수준	표준기관 요구수준	현장 요구수준	표준기관 요구수준
웨이퍼선폭	10.8 nm	3.6 nm	4.0 nm	1.3 nm
웨이퍼 overlay	58 nm	19 nm	25 nm	7.4 nm
마스크선폭	14 nm	4.6 nm	7 nm	2.5 nm
Registration	35 nm	11 nm	15 nm	5 nm

2. 기반기술

길이 관련량을 측정하기 위해서는 측정하고자 하는 피측정물의 측정점에 측정용 프로브(probe, 탐침)를 위치시킨 후 다음 측정점으로 이동하여 다시 프로브를 위치시키는 작업이 필수적이며, 이 두 위치에서 프로브의 위치를 측정하고 동시에 프로브에서 검출한 측정점의 위치를 조합하여 두 측정점 사이의 거리가 계산된다. 모든 길이 관련량 측정이 그러하듯 nanometrology 를 구현하기 위해서도 위의 과정이 기본이며 단지 이에 요구되는 정밀정확도만 차이가 있다. 이러한 측정요소는 크게 이동장치, 그 이동량을 측정하는 자(rule), 그리고 측정하고자 하는 측정점의 위치를 검출하는 프로브로 나눌 수 있다. 또한 이런 측정의 기본 요소들이 결합된 측정기의 성능을 평가할 수 있는 표준화 및 교정 기술이 측정의 기반기술이라 할 수 있다.

2.1 변위측정기술

이동장치의 이동량을 측정하는 자의 경우, 자가 갖고 있는 오차가 그대로 측정값에 전파되기 때문에 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 간섭현상을 이용한 레이저길이측정기가 나노미터 수준의 길이측정에서도 가장 널리 사용될 방법임에 의심할 여지가 없다. 레이저는 미터표준에 직접 소급이 되고, 긴 거리를 측정할 수 있고, 파장이 sub- μm 이기 때문에 고 분해능을 얻을 수 있는 등 길이측정기가 갖고 있어야 할 많은 장점들을 구비하고 있다. 레이저길이측정기의 경우 상업적

으로 많이 발전하였는데 주로 측정속도와 분해능 향상에 집중되었다. Nanometrology 관점에서 볼 경우 수백 mm 범위에서 nm 수준의 정확도와 sub-nm 의 정밀도를 이룩하여야 한다. 정확도를 결정하는 요소는 레이저 광원의 주파수 안정도, 파장을 결정하는 공기굴절률 측정의 정확도, 그리고 열팽창의 원인인 온도이다. 현재의 능력으로 볼 경우 주파수 안정도는 일반적인 안정화 방법으로 10^{-8} 수준을 얻고 있으며 표준기급의 경우 10^{-13} 의 안정도를 이루고 있기 때문에 현재의 수준에서 주파수안정도는 크게 문제가 되지 않는다. 공기 중 에서 측정이 이루어질 경우 우선 공기굴절률 측정이 가장 큰 문제점으로 대두될 수 있다. 현재의 기술 수준으로는 2×10^{-8} 이 공기굴절률 측정의 한계이며 이 이상의 정확도를 요구하는 측정은 대부분 진공에서 이루어질 것으로 예상되고 있다.

최근 레이저길이측정에 있어 가장 큰 성과는 정확도 향상에 있다. 단일 주파수의 광원을 사용한 homodyne 간섭계와 두 주파수의 광원을 사용한 heterodyne 간섭계 모두 optical mixing 에 의한 비선형성이 정확도에 제약을 주고 있다. 보통의 경우 이 비선형성 오차는 heterodyne 간섭계에서 수 nm 이상이고 homodyne 의 경우 간섭계를 잘 정렬할 때 nm 수준이다. 일반적으로 heterodyne 간섭계가 널리 사용되고 있기 때문에 이 간섭계에 대한 비선형성과 이것을 축소할 수 있는 방법에 대한 연구에서 많은 성과가 있었다. 두 주파수 성분의 편광이 혼합된 광원을 사용하는 대신에 다른 주파수의 성분을 갖는 분리된 광원을 사용함으로써 비선형성의 원인인 polarizing mixing 를 원천적으로 제거한 간섭계가 고안되어 수십 pm 수준으로 비선형성을 축소한 연구가 발표되었는데 현실적인 면에서 간섭계에 직접 적용하기에는 여러 제약이 예상된다.⁽¹⁻⁴⁾

그림 1 은 한국표준과학연구원에서 개발한 Zeeman 안정화 He-Ne 레이저를 광원으로 한 heterodyne 간섭계에서 간섭계가 갖는 비선형오차와 이 비선형오차를 제거한 실험결과이다. 그림에서 보정 전의 신호는 heterodyne 간섭계가 갖는 4nm 정도 진폭의 주기적인 비선형오차와 정전용량센서가 갖는 완만한 비선형오차를 함께 보여주고 있다. 본연구실에서 개발한 보정회로에 의해 주기적인 오차를 제거하고 정전용량형센서(capacitance gauge)의 비선형성을 5 차 다항식 곡선

맞춤에 의해 제거한 경우의 두 측정기의 차이가 아래에 있는데 sub-nm 이하의 차이를 보여준다. 여기서 heterodyne 간섭계의 비선형성오차는 전자적인 방법으로 교정하였다.

레이저길이측정시스템은 가격과 설치 장소에 제약을 받고 있으며 특히 외부 환경이 나쁜 경우 정확도가 떨어진다. 이런 경우 linear scale 를 사용하여야 하는데 최근 회절현상을 이용하여 nm 의 분해능과 10^{-6} 이상의 정확도를 갖는 상용의 장치가 보고되어 수백 mm 이하의 측정범위에서 사용할 수 있다. 한편 짧은 거리를 측정하기 위한 고분해능 센서에 대한 연구는 정전용량형센서에 집중되고 있다. 보통 수십 μm 의 측정범위에서 sub-nm 의 분해능을 갖고 있는 상용장치가 출시되었는데 레이저 간섭계 등으로 교정하였을 경우 전 측정범위에서 0.01% 이하의 정확도를 보장하고 있다.

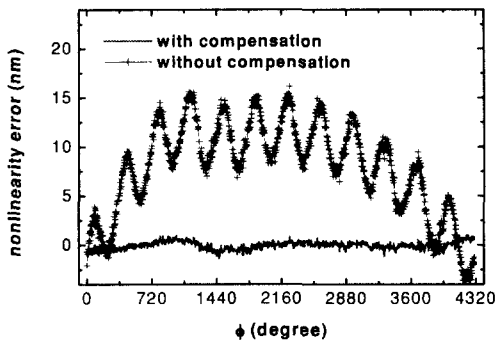


Fig. 1 Difference of the measurement between the laser interferometer and the capacitance gauge

2.2 이동장치

정밀길이측정장치나 정밀가공기에 사용된 이동장치의 경우 공기베어링이나 유압베어링을 사용한 구조가 주류를 형성해 왔다. 그러나 이러한 베어링의 경우 두 가지 면에서 문제점을 갖고 있다. 우선 유체의 흐름에 의한 수 nm 수준의 진동을 제한하지 못하고 진공에서의 사용이 제한된다는 것이다. 최근 공기베어링 패드에 가압기체를 공급하는 패드와 기체를 빨아들이는 진공 패드를 결합하여 진공에서 사용이 가능한 공기베어링을 개발하여 리소그라피 장치에 적용하고 있다. 이것은

패드 가운데에 있는 노즐을 통해 가압 기체를 공급하여 이것으로 패드를 부상시킨 후 다시 패드 가장자리에 있는 진공용 노즐을 통해 공급된 기체 전량을 흡수 제거하는 방식으로 이것은 강성을 높이기 위해 진공패드를 함께 사용했던 기존의 공기베어링을 개선한 것으로 공기베어링이 갖는 장점인 저 마찰력에 의한 빠른 이동속도와 평활 효과에 의한 스테이지의 운동정확도 향상을 그대로 갖게 되나 진동문제는 해결되지 않다. 그러나 이 방식은 측정기에서 보다 생산성과 진공이 요구되는 차세대 전자선 리소장비에 적용될 가능성이 높다. ⁽⁵⁾ Nanometrology 에서는 많은 경우 진공에서 측정이 이루어지고 있으며 AFM 이나 STM(scanning tunneling microscope)의 tip 이 프로브로 사용되는 경우가 많이 증가하고 또한 측정대상물의 무게가 크지 않기 때문에 아주 고전적인 베어링인 무급유, 마찰패드를 사용한 베어링이 사용이 증가하고 있다. 이를 위해 마찰계수가 적고, 압축률과 마모가 적은 재질의 패드를 개발하고 있다. 이런 재질로 가장 주목을 받고 있는 것이 PTFE 소재이다. 베어링의 강성을 높이고 베어링 패드형상의 가공정밀도를 좋게 하기 위해 베어링 전체를 PTFE 소재로 사용하지 않고 금속재질로 베어링의 몸체와 패드 형상을 정확하게 가공한 후 PTFE 소재를 코팅하는 기술이 사용되고 있다.

측정장치는 가공장치보다 정확한 위치 제어와 빠른 이동 속도가 요구되지 않기 때문에 구동장치의 경우 고전적인 방법인 모터와 리드 스크류(lead screw)에 의한 구동이 주류를 이루고 있다. 그러나 진동 및 위치제어 능력 등이 문제가 되고 있는 경우에 청정 환경에서 사용이 가능한 선형모터의 적용이 증가하고 있다. 또한 기존의 inchworm 모터에서 문제가 되었던 정속운동과 slip & slip 문제를 해결하고자 하는 연구가 일부 진행되고 있다. 긴 거리 이동이 가능한 스테이지는 필연적으로 정확한 위치제어에 어려움이 수반되고 스테이지 자체의 운동오차를 보정할 수 있는 기구가 없기 때문에 위의 global 스테이지(stage)와 micro 스테이지를 결합한 이중 구조가 많이 사용되고 있다. 이 경우 마이크로 스테이지는 monolithic flexure 방식의 구조가 일반적으로 사용되고 있는데 미세구동뿐 아니라 회전오차를 보정하거나 아주 미세한 정렬을 이룰 수 있는 장치들이 대부분 이 구조를 사용하고 있다. ⁽⁶⁾

2.3 Probing 기술

현존하는 여러 측정방식의 거칠기측정기들의 측정영역을 AW(amplitude-wavelength) mapping 으로 도시한 그림 2 를 보면 측정방법이 주로 amplitude 와 spacing 이 모두 큰 영역에서 모두 작은 영역으로 발달해 오고 있다. 그런데 인위적인 고집적 디바이스의 패턴들은 amplitude 가 커지고 spacing 은 작아지는 high aspect ratio 의 방향으로 발전하고 있다. 공간분해능이 좋다고 알려진 STM, AFM 등을 포함한 모든 SPM(scanning probe microscope)들은 표면이 nm 수준으로 평탄할 경우에만 최상의 공간분해능을 보인다. 따라서 고분해능의 high aspect ratio 영역이 비어 있음이 눈에 띄며, 이 영역에 대한 측정방법이 적극 개발되어야 함은 분명하다.

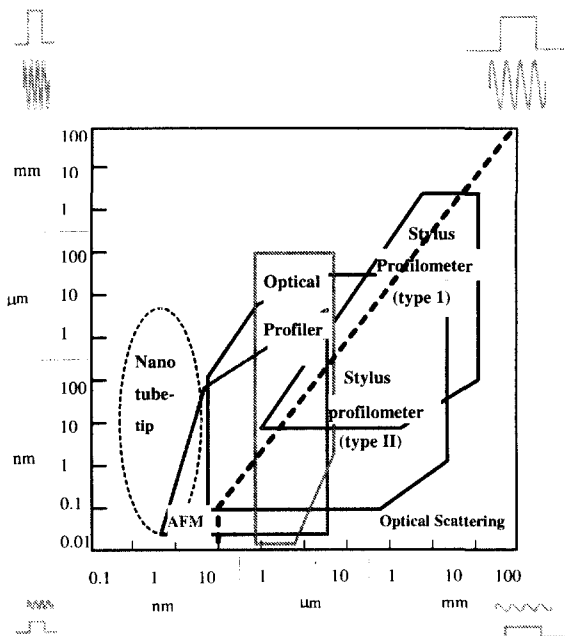


Fig. 2 Amplitude-wavelength mapping on surface roughness measurement

나노측정 기술을 요구하는 대표적인 첨단분야인 반도체 산업의 여러 측정 분야 중 높은 공간분해능과 top-down microscopy 가 동시에 요구되는 CD(critical dimension) 측정의 경우, 2004, 5년 이후에 필요한 측정방법이 아직 정확하게 알려지지 않고 있으며 가능한 해결책으로 CD-SEM, CD-AFM,

Electron Holography 방법 등이 제시되고 있다. 지금까지의 측정은 고속 측정의 장점으로 인하여 FESEM(field emission SEM)을 기초한 CD-SEM 에 주로 의존하여 왔다. 그러나 고배율에서 초점심도의 단축, 측정시편 내에서 전자들의 다중산란 및 확산현상 등에 의하여, 100 nm 이하 CD 측정에서는 이론적 한계를 갖고 있음이 알려져 있다. 그 대신 역시 전자빔에 기초한 것으로써, 코히런트한 전자빔을 이용한 in-line holography 인 소위 electron holography (또는 PPM, point projection microscopy) 방법이 제시되었다. 한편 원자수준의 공간분해능을 갖는 SPM 을 이용한 CD-SPM 이 CD 측정에 사용되기 시작하였다. 초기에는 피라미드 형태의 탐침에 의한 convolution 효과가 커서, SEM 의 경우보다 실용성이 떨어졌었다. 그리하여 구(sphere)와 같은 형태의 탐침을 사용하여 convolution 문제를 해결하였으나, CD 가 200 nm 이하가 되면서 이와 같은 특수 탐침을 사용할 수 없게 되었다. 최근 제시된 카본나노튜브 팁(carbon nanotube tip, CNT tip)은 이 문제를 해결할 가능성을 보여주고 있다. 이상의 방법들은 고유한 장점 외에 극복해야 할 몇 가지 문제들도 안고 있으며 이 부분에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행 중이다.

카본나노튜브 팁에 대한 연구들은 1996 년 Rice University 의 Smalley 그룹에서 최초로 Si AFM tip 에 MWNT(multi-wall nanotube)를 붙이는데 성공함으로써 촉진되었다고 볼 수 있다. 그들은 이러 probe 를 이용하여 폭 400 nm, 깊이 800 nm 의 high aspect ratio trench 를 기존의 AFM tip 에 비해 훨씬 정확히 읽을 수 있음을 보였고, trench 바닥에 내려가서 바닥면의 거칠기까지 볼 수 있었다.⁽⁷⁾ 콜롬비아대학의 G. Nagy 등은 동일한 방식으로 제작된 MWNT-tip 을 이용하여 에칭된 GaAs feature 와 에칭조건에 따른 마스크의 손상을 기존의 Si₃N₄ tip AFM 이나 SEM 에 비해 보다 정확하게 읽을 수 있었다.⁽⁸⁾ Hongjie Dai 등은 MWNT-tip 을 이용하여 Si 표면 위에 10 nm 의 폭을 가진 산화 패턴을 그렸으며, 오랫동안의 문제이던 tip 마모문제를 해결할 수 있다고 발표하였다.⁽⁹⁾ 일본의 Osaka Prefecture University 의 Nakayama 교수팀에서는 AC electrophoresis 방법으로 MWNT 를 면도날에 수직하게 붙인 후, SEM 으로 관측하면서 nano-manipulator 를 사용하여 면도날에 붙은 나노튜브

를 상용화 AFM tip 에 접근시켰고 SEM chamber 내의 hydro-carbon 등과 같은 불순물을 e-beam 을 이용하여 나노튜브와 닿아있는 AFM tip 면 위에 증착하여 접착하였다. (10-15) Ramsey M D Stevens 등은 CNT 와 cobalt-coated Si tip 사이에 직류 전압을 걸어주어 순간적인 방전을 일으켜 둘을 붙였으며 제작된 CNT tip 을 이용하여 protein structure 의 AFM image 를 얻었는데 상용 Si tip 을 사용했을 때의 측정 artifact 를 줄일 수 있음을 보였다. 그러나 광학현미경을 사용하였기 때문에 방전 불꽃만으로 부착되는 시기를 알아내었고, 이후 전자현미경으로 상태를 확인하는 방식이었으며, 이 작업이 반복성을 갖기 위해서는 많은 추가 작업이 필요하다고 기술하였다. (16)

위에서 기술한 기계적 조작 및 접착을 이용하는 CNT tip 제작방법과는 다른 방식의 연구가 역시 많은 관심을 끌고 있다. 지금까지의 기계적인 접착방법의 단점인 긴 가공시간과 재현성이 있는 가공이 어려운 단점을 극복하고 대량생산의 길을 마련하기 위하여, 최근 하버드대학의 J. H. Hafner 등은 chemical vapor deposition(CVD)을 이용하여 Si tip 에 직접 nanotube 를 성장시키는데 성공하였을 뿐만 아니라, AFM tip 으로서의 사용이 가능함을 보였다. (17)

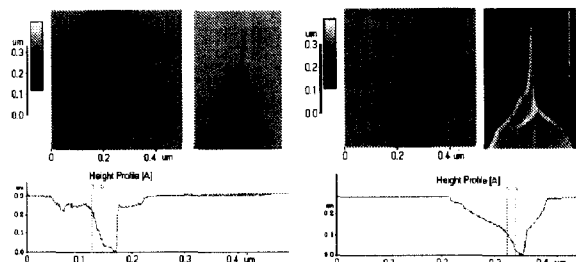


Fig. 3 Comparison nanotube tip fabricated at KRISS and commercial sharp tip machined by FIB

그림 3 은 표준연에서 SEM 과 nano-manipulator 을 이용하여 제작한 나노튜브팁(왼쪽)과 FIB (focused ion beam)으로 팁 끝을 날카롭게 한 상용 팁을 보여주고 있으며 이들로 동일 시편의 격자 형상을 측정한 그림이 하단에 있다. 측정된 profile 을 보면 나노튜브팁이 보다 정확한 형상을 검출함을 알 수 있다. (18-20)

2.4 나노미터의 표준화

정확도 평가를 위한 기술은 레이저간섭계나 capacitance gauge 와 같은 초정밀 길이센서를 교정할 수 있는 기술과 전 측정시스템의 종합적인 교정이나 성능을 평가할 수 있는 기준물에 관한 기술이 있다. 전자의 경우 X 선과 광학간섭계를 결합한 COXI(combined optical X-ray interferometer)연구가 EU(유럽연합)를 중심으로 진행되어 현재 십 pm 수준의 정확도를 얻고 있으며 이것을 이용하여 레이저 간섭계의 비선형성을 평가한 결과가 발표되었다. 이 X 선 간섭계는 Si 의 격자간격을 기준으로 사용한 것으로 기존의 광학간섭계의 눈금간격이 sub-um 수준이라면 이 X 선 간섭계의 눈금간격은 수 Å 으로 눈금간격이 수천 배 작게 되어 분해능이 매우 좋은 기준자로 사용할 수 있다. (21) 그림 4 는 매우 얇은 단결정 실리콘 날을 이용한 X 선 간섭계의 원리를 보여주는 그림이다. X 선이 Bragg 각으로 입사되면 하나는 투과되고 하나는 회절된다. 이 X 선은 다시 얇은 실리콘 날인 mirror(M)에서 투과와 회절이 되어 analyzer(A)에서 간섭된다. 이 때 M 과 A 의 실리콘 격자가 나란하게(in plane) 있으며 A 를 통과한 X 선의 강도는 최대가 되고 서로 어긋나면(out of plane) 강도는 약해진다. 따라서 A 의 실리콘 날이 격자간격 만큼 이동할 때마다 X 선의 신호는 정현파로 변하게 된다. 실리콘의 격자 간격이 Å 수준이기 때문에 매우 간격이 촘촘한 자의 역할을 하게 된다. 이런 장점이 있는 반면 X 선 간섭계는 장치가 크고 측정범위가 짧으며 X 선에 대한 안정성이 큰 문제점이다.

최근 연구가 시작된 주파수 추적형 Fabry-Perot 간섭계는 수 pm 수준의 분해능과 비교적 넓은 측정 범위를 갖고 있기 때문에 COXI 를 대신할 방법으로 각광을 받고 있다. 이 장치는 길이측정기의 교정에 사용될 수 있을 뿐 아니라 측정범위가 짧은 z 축에 직접 부착하여 사용할 수 있다. (22) 그림 5 는 표준연에서 개발한 주파수 추적형 Fabry-Perot 간섭계의 개략도이다. 주파수가 변할 수 있는 반도체 레이저의 빛이 Fabry-Perot 간섭계에 입사되는데 간섭신호의 피크에 안정되도록 반도체레이저의 주파수를 변경시킨다. 동시에 기준 레이저인 He-Ne 레이저와 빛을 혼합하여 맥놀이주파수를 측정하므로써 반도체 레이저의 주파수를 결정한다. Fabry-Perot 에 부착된 PZT 의 전압을 변경하여 한 쪽 거울을 움직이면 즉, 간섭계의 길이를 변화시

키면 간섭신호의 세기가 달라진다. 그런데 Fabry-Perot 의 투과된 간섭신호가 항상 피크에 있도록 반도체 레이저의 주파수를 변경시키고 이때의 주파수를 기준 He-Ne 레이저와의 맥놀이 주파수로 측정하여 처음 주파수와 나중의 주파수 차이로써 Fabry-Perot 거울의 이동길이를 계산할 수 있게 된다. 이 방법은 비교적 간단하게 긴 거리에서 수십 pm 이하의 정확도로 측정이 가능하나 주파수를 tracking 하여야 하는 어려움이 있다.

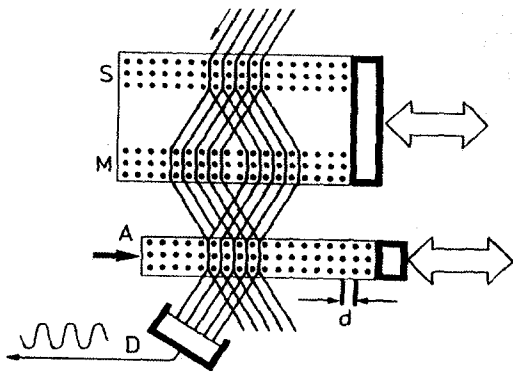


Fig. 4 Principle of X-ray interferometer using Si single crystal blades

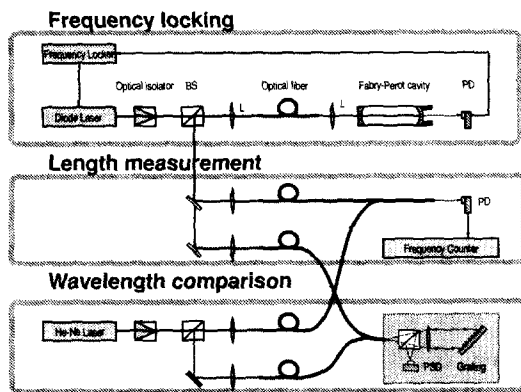


Fig. 5 Block diagram of frequency tracking Fabry-Perot interferometer developed in KRISS

측정장치를 종합적으로 평가하거나 교정하는데 적용할 수 있는 기준물 개발에 관한 연구는 미

국 표준기관인 NIST 에서 가장 활발하게 이루어지고 있는데 기존의 제작된 기준량을 측정하여 기준물의 고정값을 제공하는 수준이 아닌 자연계에 존재하는 원자나 분자의 구조적인 특성을 이용하여 표준물질의 개발 연구가 수행되고 있다.

3. 측정시스템

위에서 설명한 여러 요소들이 결합하여 측정시스템이 구성된다. 이런 측정장치는 측정 대상, 요구 정확도, 측정 tool 에 따라 다양한 모양을 갖게 된다. 이런 다양한 측정기를 여기에서 모두 기술할 수 없으므로 최근 표준연구기관에서 개발한 SPM 과 SEM 에 기반한 초정밀 측정기에 대하여 기술하고자 한다. 이와 같은 측정기 중에서 대표적인 것이 NIST 에서 개발된 M3(Molecular Measuring Machine)이다.⁽²³⁾ 이 측정기는 1980년대 후반부터 개발하기 시작하여 현재까지 진행되고 있는 프로젝트로 STM 을 기본 틀로 사용하고 있다. 측정범위는 50 mm x 50 mm 이며 1 nm 의 정확도를 목표로 하고 있다. 반도체를 주 측정대상으로 하였으며 선폭, 단차, 피치, 2 차원 위치 측정이 가능하도록 되어 있다. 전체의 측정시스템은 여러 개의 cell 로 분리되어 있어 진동 및 소음을 제거하고 온도 안정을 이루도록 되어 있다. 외곽은 수동 공기 방진 장치와 음향 차단 cell 로 되어 있고 그 안에 진공용 cell 이 위치한다. 진공용 cell 안에 능동진동제어기가 위치해 있다. 능동진동제어기 안은 다시 온도 조절을 위한 cell 이 놓이고 이 안에 최종의 측정시스템이 위치한다. 이 core 부분은 반구가 상하로 위치해 있어 기구적으로 가장 안정성을 갖는 진구 모양을 갖는다. 하단의 반구에는 시편과 위치 측정의 기본이 되는 간섭계용 직각거울이 위치한 X 축의 이동장치가 있다. 상단은 STM 프로브와 간섭계용 광학부품이 놓일 Y 축 이동장치가 있다. 이동장치는 lead screw 와 flexure 를 이용한 2 중 구동기구를 사용하고 있으며 PTFE 패드를 조동기구의 베어링으로 사용하고 있다. 간섭계는 횡자장 Zeeman 레이저를 사용한 heterodyne 간섭계를 사용하고 있으며 소프트웨어적인 방법에 의해 비선형오차를 보정하고 있다. 현재 이 장치가 얻고 있는 정확도는 대략 10 nm 수준이다. 한편 이와 유사하나 측정범위가 매우 짧은 MAFM(metrological atomic force microscope)가 여러

표준기관에서 개발되었는데 상용의 AFM 에 metrological frame 을 부착하여 시편이나 프로브의 위치 변화를 PZT scanner 의 인가 전압이 아닌 레이저간섭계나 교정된 정전용량형 센서로 측정하도록 되어 있다. 정밀한 flexure 를 사용한 이동장치는 보통 수 100 μm 이내의 측정범위를 갖고 있다. 이러한 장치는 주로 단차, 선폭 등을 측정대상으로 하고 있다.⁽²⁴⁻²⁵⁾

한편 독일 PTB 에서는 FESEM 을 기반으로 한 EOMS(electron optical metrology system)을 개발하였다. 이 장치는 전자선 리소그래피 장치를 개조한 것으로 측정범위는 300 mm x 300 mm 이다. 장치는 수동 공기방진장치 위에 놓여 있으며 진공조와 전자선 column 은 온도조절이 가능하다. 진공조에 PTFE 패드를 베어링으로 사용한 2 축 이동기구가 있다. 이 이동기구는 one level 로 되어 있어 높이가 매우 낮아 무게 중심이 낮은 위치에 있어 기구적으로 안정하며 각도오차를 측정하기 위해 레이저각도간섭계와 자동시준기가 설치되어 있다. EOMS 는 기존의 광학현미경으로 측정하였던 마스크의 선폭과 위치 측정을 대체하고자 하였으며, CD SEM 의 배율을 기준으로 측정하던 웨이퍼의 선폭을 이 장치로 측정하고자 개발되었다. 현재 전 측정범위에서 10 nm 의 반복성을 얻고 있다.⁽²⁶⁾

그림 6 은 현재 한국표준과학연구원에서 제작하고 있는 long scan metrological AFM 의 개략도이다. 이동스테이지의 경우 50 x 50 mm² 범위를 갖는 스테이지를 제작하였는데 2 축의 global stage 와 2 축의 micro stage 를 하나의 시스템에 통합시켜 구조를 간단하게 하였다. 광학면으로 가공된 유틸칼 플랫폼을 기준으로 한 global stage 는 테프론 패드를 사용한 미끄럼식 베어링을 사용하였고 자기력에 의해 스테이지를 구속하여 안내하도록 설계 제작하였다. 또한 X, Y 의 2 축이 분리되어 있지 않고 동일 몸체를 사용하고 있으며 이 global stage 내부에 2 축의 micro stage 를 설치하여 구조를 매우 간단하게 하였다. 이런 구조는 근본적으로 yaw 운동과 2 축의 직각도에 문제가 있으나 이것은 metrology frame 에서 측정하여 보정하도록 되어 있다. 나노미터 수준의 정확도를 갖는 이동장치의 가공은 현재의 기술로 불가능하기 때문에 이동장치가 갖는 운동오차를 측정하여 보정도록 설계하였다. 운동오차를 측정 보정하는 기구가 시스템에 부가되어야 하기 때문에 global stage 와 micro stage

의 운동오차보다 기구적으로 간단한 구조를 갖도록 하여 안정성을 향상시키도록 하였다. 그림에서 표시하지 않았으나 AFM 프로브가 위치하는 Z 축 스테이지가 유틸칼 플랫폼에 위치한다.

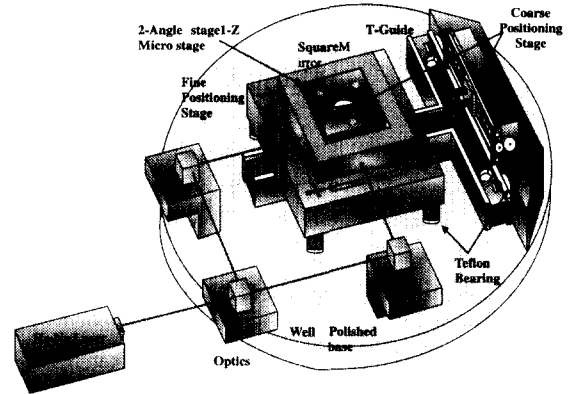


Fig. 6 Block diagram of metrological atomic force microscope of KRISS

4. 결론

21 세기를 주도할 주요기술 중의 하나가 나노기술로 평가받고 있다. 이 나노기술은 현재 전세계적으로 급격한 기술 진보가 이루어지고 있다. 전자 분야뿐만 아니라, 생명공학, 화학, 재료 및 초정밀기계 등 과학과 기술 전 분야에서 연구가 진행되고 있으며 몇 분야에서는 실용화 단계에 있다. 나노기술은 결국 나노미터 수준의 크기나 변위를 제어 조작하는 가공기술이고 nanometrology 기술은 이런 양을 관측하여 정량화하는 측정기술이므로 나노기술이 실용화되어 대량 생산에 들어갈 경우 nanometrology 기술이 필수적으로 병행되어야 한다. 현재 단일 소자 수준의 연구가 진행되고 있는 나노소자가 집적화되고 대량 생산되기 위해서는 치수의 제어 및 측정이 필수적이다. Nanometrology 기술은 크게 나노위치제어 및 측정 기술과 프로브 기술로 대별될 수 있는데 이런 기술은 가공기술인 나노기술에도 핵심적으로 필요한 기반기술이며 나노기술의 분야에 따라 다른 기술이 요구되는 반면에 nanometrology 는 기술분야에 상관 없이 공통적으로 적용할 수 있는 특성이 있다.

나노기술은 다른 산업에 비해 선진국과 기술

격차가 비교적 적은 분야로 21 세기 우리나라의 산업을 이끌 중요한 기술이다. 따라서 나노기술의 핵심이 되는 nanometrology 의 기반기술을 확보함으로써 nanometrology 분야의 표준확립은 물론 나노미터 수준의 측정기 개발 및 나노 리소그라피 등 나노기술 개발의 기초를 마련할 필요가 있다.

참고문헌

1. John Lawell and Ernst Kessler, Review of Scientific Instrument, Vol. 71, pp. 2669, 2000.
2. Hou. W and Wilkening G., Prec. Eng., Vol. 14, pp. 91, 1992.
3. Chien-Ming Wu et al., Applied Optics, Vol. 38, pp. 4089, 1999.
4. 김중윤, 엄태봉, 정규원, 최태영, 이진희, 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 9 호, pp. 171. 2001
5. W. T. Novak, D. Watson and Y. Yoda, Proceeding ASPE 2000 Annual Meeting, pp. 517, 2000.
6. W. Hassler-Grohne and H Bosse, Meas. Sci. Technol, Vol. 9, pp. 1120, 1998.
7. Hongjie Dai, et al., Nature, Vol. 384, pp. 147, 1996.
8. G.Nagy, et al., Applied Physics Letter, Vol. 73, pp. 529, 1998.
9. Hongjie Dai, Nathan Franklin, and Jie Han, Applied Physics Letters, Vol. 73, pp. 1508, 1998.
10. Takayuki Arie, et al., J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 18(1), pp. 104, 2000.
11. Yoshikazu Nakayama, Hidehiro Nishijima, and Seiji Akita, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 18(2), pp. 661, 2000.
12. Hidehiro Nishijima, et al., Applied Physics Letters, Vol. 74, pp. 4061, 1999.
13. Seiji Akita, et al., J. Phy. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. 1044, 1999.
14. Nami Choi et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 9, pp. 3707, 2000.
15. Takayuki Uchihashi et al., J. Appl. Phys., Vol. 39, pp. L887, 2000.
16. Ramsey M D Stevens, et al., Nanotechnology, pp. 1, 2000.
17. Jason H. Hafner, Chin Li Cheung, and Charles M. Lieber, Nature, Vol. 398, pp. 761, 1999.
18. 정기영, 박병천, 오범환, “탐소나노튜브의 AFM 탐침 이용,” 한국물리학회 회보 제 17 권 제 2 호, pp. 400, 1999.
19. 정기영, 박병천, 송원영, 오범환, “AFM 용 multi-wall carbon nanotube tip 의 제작과 시료 측정,” 한국물리학회 회보 제 18 권 제 1 호, pp. 129, 2000.
20. 송원영, 정기영, 박병천, 오범환, 엄태봉, “Nanotube-tip 개발을 위한 nanomanipulator 의 제작” 2000 년 추계 한국물리학회, 2000.
21. EC-Contract No: 3422/1/0/182/4/91-BCR-D(30), “Combined Optical and X-ray Interferometry for High Precision Dimensional Metrology,” 1997.
22. H. Haitjema et al., Metrologia, 37, pp. 25, 2000.
23. E. C. Teague, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 7, pp. 2274, 1989.
24. J. Schneir, T. H. McWaid, J. Alexander, and B. P. Wilfley, J. Vac. Sci. Technol. B. Vol. 12, pp. 3561, 1994.
25. S. Gonda, T. Doi, T. Kurosawa, and Y. Tanimura, Rev. Sci. Instrum. Vol. 70, pp. 3362, 1999.
26. W. Häbler-Grohne and H. Bosse, Meas. Sci. Technol Vol. 2, pp. 1120, 1998.