

초정밀 표면측정기술의 동향

김 승 우*

1. 머릿말

산업기술의 발달에 따라 각 분야마다 정밀한 부품을 요구하고 있다. 이는 이들 부품이 시스템의 성능에 영향을 미치고 있기 때문이다. 부품의 정도는 길이정도와 표면의 정도를 모두 의미한다. 길이정도는 부품의 상대적 크기정도를, 표면정도는 3차원 형상정도를 나타낸다. 이들 부품의 정도를 평가하기 위해서는 반드시 측정이라는 방법이 수행되어야 하며, 측정은 요구되는 측정정도에 따라 이에 상응되는 방법으로 행해지게 된다. 요구되는 측정정도는 시간이 지남에 따라 점차 증가되고 있다. 이러한 경향은 그림 1의 시대에 따른 측정정도를 보면 확인할 수 있다. 시대에 따라 측정정도는 급격히 증가하고 있고 현재의 측정은 초정밀측정이라 말하는 약 0.1nm의 정밀도를 갖고 있다.

측정정도에 따라 표면측정기술도 여러가지 방법이 행해지고 있는데 이들 측정방법은 크게 접촉식 측정방법과 비접촉 측정방법으로 나눌 수 있다. 대표적인 접촉식 측정방법으로는 축침식 측정방법을 들 수 있다. 이 방법은 다이아몬드 축침을 표면상에 접촉하여 주사이동하게 하고 이때 표면의 요철에 따른 축침의 상하운동을 고성능 변위센서를 이용하여 표면형상을 측정하는 것이다. 이는 1nm의 수직분해능을 갖고 측정이 가능하다. 이 방법은 표면에 접촉함으로써 인해 신뢰성이 높지만, 표면의 접촉압력으로 인해 표면의 손상 우려가 있다. 이런 이유로 현재 비접촉 측정방법이 주목받고 있다. 표면측정을 실현하는 데에는 광학기술이 적극적으로 활용되고 있으며, 최근에는 물리학의 원리들이 도입되고 있다. 본 글에서는 이러한 측정기술의 기본원리를 소개하고 각 기술이 응용되는 예를 소개하고자 한다.

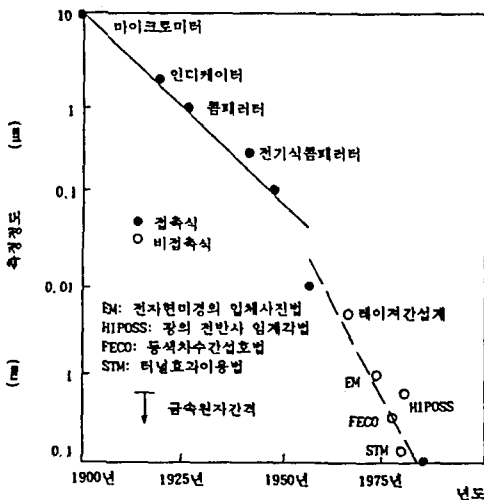


그림 1 연도별 측정정도

2. 광산란(Light Scattering)

광산란을 이용한 표면정보측정은 측정하고자 하는 표면에 광을 입사시켜 이로부터 표면의 상태에 따라 반사되는 산란정도를 분석하여 표면의 상태를 해석한다(2). 현재 여러가지 방법들이 연구개발되고 있으며 이들 중 대표적인 방법으로는 TIS(Total Integrated Scattering) 방법, 광학회절기법, 실험적인 방법, Beckmann 방법 등을 들 수 있다. 이들은 모두 각각의 고유한 원리적 기초와 특성 및 장점을 갖고 있어서 그들 나름대로의 독특한 응용 가능성을 가지고 있다. 여기서는 정밀 연삭면 표면조도측정과 반도체 웨이퍼 결함 및 이물질 검출방법에 대해서 간략히 소개한다.

광산란을 이용한 표면의 조도를 측정하는 방법은 입사광속이 표면에서 반사 될 때 발생하는 광산란을 측정하여 조도를 산출하는 방법이다. 그림 2는 광산란 패턴

* 한국과학기술원 정밀공학과

을 보여주고 있다. 입사광속이 표면에서 반사하는 경우는 정반사 부분과 난반사 부분으로 나누어지며 이를 통틀어 광산란이라 한다. 이때 반사각도에 따른 광속의 광강도 분포상태는 가우스 분포(Gaussian distribution)로 나타나는데 이를 광산란 패턴이라 한다. 이 가우스 분포의 표준편차 σ_s 는 그림 3에 보여진 바와 같이 표면 조도의 정도에 따라 변하고 있음을 알 수 있으며 이 표준편차의 변화를 관찰하면 표면조도를 간접적으로 측정할 수 있다.

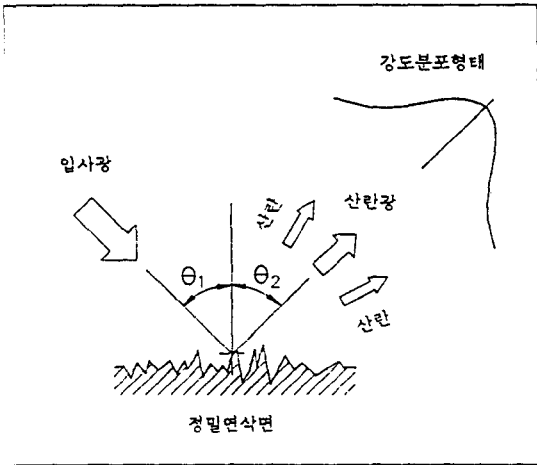


그림 2 산란광에 의한 강도분포형태

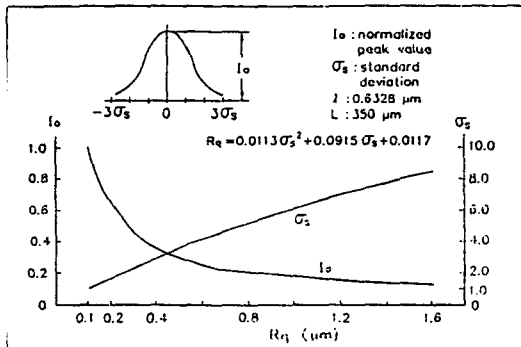


그림 3 산란광의 정규변수들과 표면조도와의 관계

반도체 웨이퍼상의 균열 및 이물질이 표면에 부착되면 패턴 결함의 원인이 되기 때문에 균열 및 이물질 검출이 반드시 필요하다. 이를 위해 광산란을 이용한 검출방법이 효과적으로 제시되어 현재 생산라인에서 널리 사용되고 있다. 검출방법은 균열 및 이물질은 주로

미세 요철부위에 존재하기 때문에 상방향에서 광을 조명하면 반사광은 난반사되는 산란광과 정반사광으로 나누어 반사되는데, 결함 및 이물질이 많은 표면은 산란광이 많은 반면 조명방향으로 반사되는 정반사광은 반대로 감소한다. 따라서 검출하는 방법도 그의 감소된 광을 검출하는 정반사 검출방식과 반대로 산란된 광을 검출하는 산란광 검출방식이 있지만 결함 및 이물질로부터 직접 산란되는 광을 검출하는 방식이 높은 감도와 높은 신호대 잡음비를 얻을 수 있고 이물질이 없는 경우는 산란광 역시 없기 때문에 결함 및 이물질의 유무 확인이 직접 가능한 산란광검출방식이 주로 이용된다.

3. 광위상간섭계 (Phase-Shifting Interferometer)

간섭현상은 안정된 2개 이상의 파두면이 합쳐졌을때 파두면들간의 위상차이로 인해 밝고 어두운 줄무늬가 생기는 현상으로 초기에는 주로 광학부품들의 굴절을 및 표면상태를 검사하는데 사용되었으나 간섭성이 뛰어난 레이저의 사용과 관련 전자기술의 발전으로 그 응용 범위가 다양해지고 실질적인 측정용 간섭계의 출현이 가능하게 되었다.

E_1, E_2 로 표현되는 2개의 직선 평면파를 중첩해보자

$$E_1 = A_1 \exp[-i(\omega_1 t + \phi_1)] \quad (1)$$

$$E_2 = A_2 \exp[-i(\omega_2 t + \phi_2)] \quad (2)$$

여기서 ω_1, ω_2 : 각 주파수 ϕ_1, ϕ_2 : 위상

$\omega_1 = \omega_2$ 인 경우 합성파의 강도 I는

$$I = |E_1 + E_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) \quad (3)$$

따라서 두 평면파의 위상차 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 변화에 의해 강도가 변하기 때문에 이를 분석하면 두광원의 상대적인 위상차를 쉽게 알 수 있다. 이 원리를 이용한 간섭계의 용도는 광학부품의 굴절을 및 표면상태, 레이저의 주파수분석등으로 부터 일반적인 길이, 압력, 온도, 공기 및 유체의 흐름, 회전체의 회전수측정, 제품의 미소 변형량등 그 사용분야가 다양하며 현재도 사용분야가 계속 확장되고 있다.

본 절에서는 초정밀 경면의 표면형상을 비접촉식이며 3차원적으로 측정가능한 광위상 간섭의 원리⁽³⁾와 종류에 대해 구체적으로 소개한다. 그림 4는 광간섭을 이용한 표면의 높이 분포를 측정하기 위한 기본 원리를 보

여준다. 단색 광원으로 부터 얻은 위상이 동일한 평행 광속을 일정 반경의 단면크기로 확대한 후 분광기에 의해 기준광속과 측정광속으로 분리한다. 이 두 광속을 기준표면과 측정표면에 각각 입사시키고 반사되어 오는 광속을 다시 광분할기에 의해 합성한다. 이때 기준표면 으로부터 반사하는 광속은 일정한 위상의 파두면을 갖는 반면, 측정표면으로 부터의 광속은 표면상의 요철에 의한 위상변화를 갖는다. 따라서 합성되는 광속의 단면상의 파두면은 위상변화에 의한 간섭이 발생하며, 간섭무늬의 강도패턴은 측정표면의 높이분포 $h(x, y)$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$I(x, y, l) = I_0 (1 + \gamma \cos(2k[h(x, y) - l])) \tag{4}$$

$$= I_0 (1 + \gamma \cos(\varphi(x, y))) \tag{5}$$

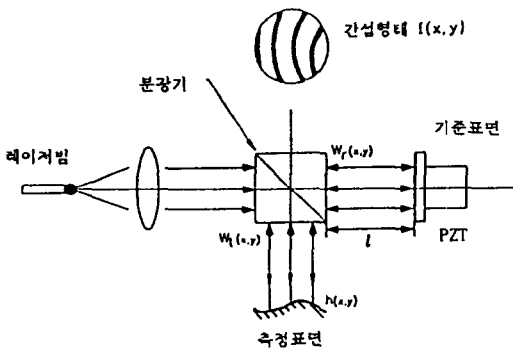


그림 4 간섭계의 기본원리

여기서 I_0 는 평균 빛의 강도 γ 은 간섭성정도를 나타내는 변수들로 윗식에서 구해야할 변수가 3개이므로 3개 이상의 강도패턴이 필요하다. 이를 위해 기준표면을 PZT 트랜스듀서를 사용하여 일정간격으로 구동하고 CCD카메라를 이용하여 각각의 강도 패턴을 얻어 실제 측정표면의 3차원 형상을 추출한다. 그림 5는 이 장비를 이용한 반도체 웨이퍼의 실제측정 결과를 보여준다. 측정결과에서와 같이 수십나노미터의 패턴높이가 정확히 측정됨을 볼 수 있다. 이때 측정수직분해능은 단색광의 파장을 632.8nm와 8bits A/D 변환기를 사용할 경우 약 1nm의 고분해능을 얻을 수 있다. 이 방법은 레이저 및 광학장비와 컴퓨터를 이용한 디지털 영상처리 기술을 도입으로 비접촉식이며 고속으로 3차원 형상을 측정할 수 있는 장점때문에 컴퓨터 하드디스크 및 폴리곤미러,

초정밀 연삭표면, 반도체 웨이퍼와 같이 초정밀 경면의 표면평가등의 사용분야가 다양한 반면 광의 회절현상 때문에 수평분해능이 1마이크로미터 정도이므로 선폭이 작은 고집적 반도체의 측정에는 적용이 어려운 단점이 있다.

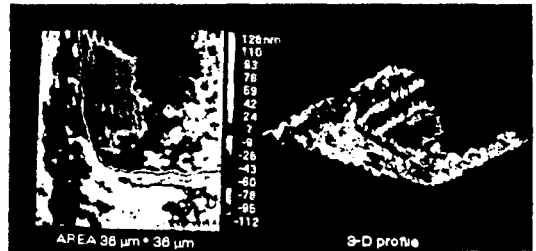


그림 5 광간섭계를 이용한 반도체 웨이퍼의 표면형상 측정예

사용간섭계는 측정목적에 적합한 간섭계를 선정하는 것이 가장 중요하다. 일반적으로 어떠한 종류의 간섭계를 사용하여도 상대위상을 구할 수 있으나 표면측정에 적합한 것은 그림 6와 같은 트위만-그린간섭계, 피조우 (Fizeau) 간섭계, 미라우간섭계, 리닉간섭계등이다. 트위만-그린간섭계와 피조우간섭계는 낮은 배율의 측정에 적합하고 고배율의 측정을 할 경우에는 미라우간섭계나 리닉간섭계를 사용하는 것이 적합하다.

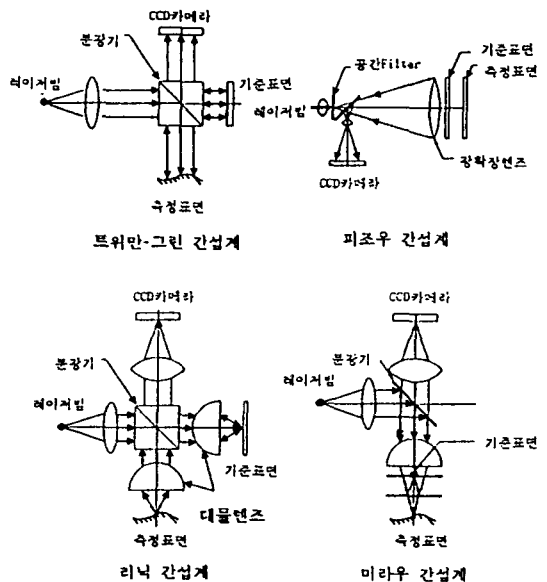


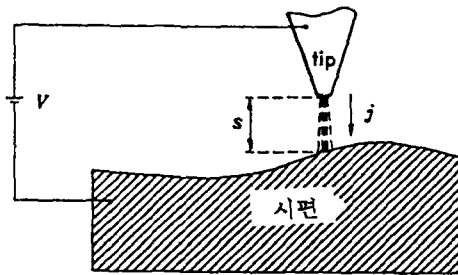
그림 6 여러종류의 광위상간섭계

4. 주사형터널링현미경 (scanning tunneling microscope)

주사형터널링현미경은 1982년 Binning, G.와 Rohrer, H. 의해서 개발된 것으로 터널링 효과를 이용한 측정장치이다(4). 터널링 효과란 그림 7과 같이 두 물체가 분리되어 절연되어 있어도 간격이 충분히 작으면 절연층을 통하여 측정가능한 전류가 흐르게 되는 현상이다. 이런 효과에 의해 전류밀도는 Simmons(5) 의해 다음과 같이 유도되었다.

$$j = K \frac{V}{s} \exp(-2ks) \quad (6)$$

윗 식에서 V는 두 도체사이에 인가된 전압을, K와 k는 물질상수들과 탐침의 형상에 의해 결정되는 상수를 나타낸다. 전류밀도와 간격과의 정성적인 관계는 일반적으로 그림 8과 같이 나타난다. 간극의 변화에 대한 전



j 터널링 효과에 의한 전류밀도
s 유효터널링 간격
V 인가전압

그림 7 터널링효과

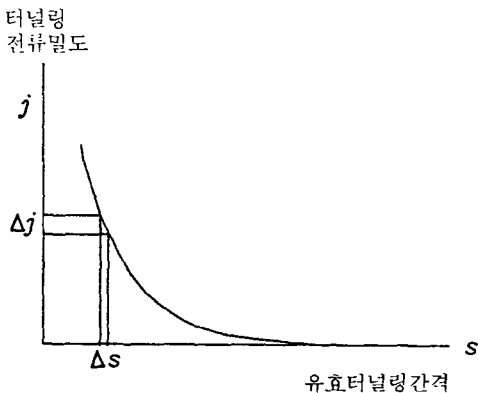


그림 8 터널링전류밀도와 유효간격과의 상관관계

류밀도의 변화 즉, 민감도가 적은 간격에서는 그림에 도시된 바와 같이 크게 나타나 원자크기정도의 측정이 가능하게 된다. 이 원리에 의해 측정가능한 수직분해능은 10pm 정도이고 수평분해능은 0.3nm 정도이다.

터널링 효과를 이용한 측정시스템은 일반적으로 세계의 미세구동기(fine actuators)와 날카로운 탐침(tip)과 제어기(controller)로서 그림 9와 같이 구성된다. 탐침과 측정시편 사이에는 수mV에서 수십mV에 이르는 일정전압을 인가하고, 탐침이 측정표면에 주사되도록 제어를 통해 XYZ축의 미세구동기를 적절히 구동함으로써 표면측정이 이루어진다. 표면을 측정하기 위한 구동방법은 크게 일정전류모드(constant current mode)와 일정전압모드(constant voltage mode)로 나눌 수 있다. 일정전류모드의 구동방법은 즉, 탐침과 시편과의 간격이 일정하게 유지되도록 즉, 터널링전류가 일정하게 유지되도록 터널링전류를 궤환(feedback)하여 Z축을 제어하며 동시에 XY축으로 표면을 주사하는 방법이다. 이 측정방법은 각축의 구동변위가 곧 측정표면의 정보를 의미한다. 일정전압모드의 구동방법은 Z축을 터널링 효과가 발생하는 영역에 고정시키고 XY축을 구동하며 이때 흐르는 터널링전류를 측정하여 식(6)에 관계식으로부터 표면의 정보를 산출하는 방법이다. 이런 구동방법으로 인해 일정전압모드의 구동방법은 표면의 요철이 약 십수 A 내에 있을 때 사용가능한 방법으로 고속측정이 가능하다. 일정전류모드의 구동방법은 표면의 요철이 십수 A보다 커도 측정이 가능하지만, 전자보다는 측정시간이 긴 단점을 갖는다.

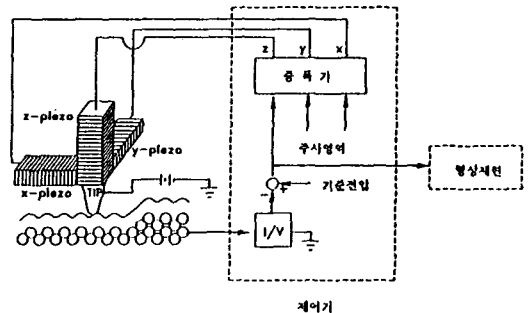


그림 9 주사형터널링현미경의 원리도

이 측정시스템은 표면원자분포(6), DNA와 같은 생물학적 구조(7)측정에 많이 사용되었고, 또한 반도체와 같이 미세한 패턴측정(8)에도 응용되고 있다. 한 예로 그

림 10(a)는 주사형터널링현미경을 이용하여 결합된 결정체의 Te와 S의 원자표면을 측정한 형상이며, 그림 10(b)는 집적회로를 측정한 형상을 보여주고 있다. 이러한 형상들은 모두 원자 크기 정도의 측정분해능을 갖고서 측정된 결과이다. 이와 같이 주사형터널링현미경은 비접촉식 측정방법으로 높은 측정분해능을 갖고 있어 고정밀을 요하는 형상측정에 더 많이 응용될 것으로 생각되어진다.

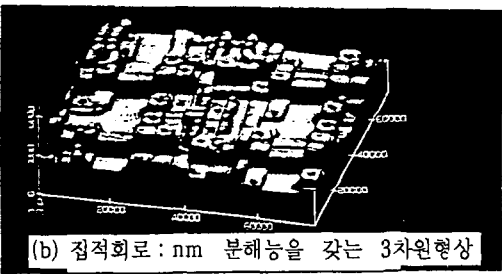
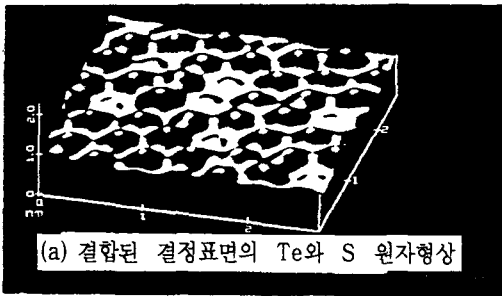


그림10 주사형터널링현미경을 이용한 측정에

주사형터널링현미경과 유사한 또다른 측정방법으로 원자간력현미경(atomic force microscopy)을 들 수 있다 이는 원자간의 반발력을 이용한 형상측정장치이다. 측정시스템은 그림 11과 같이 탐침과 외팔보와 변위를 검출하는 주사형터널링현미경으로 구성된다⁽⁹⁾. 외팔보의 끝단에 부착된 날카로운 탐침이 표면에 근접되면 표면의 원자와 탐침의 선단원자간의 반발력에 의해 외팔보에 변형(deflection)이 발생된다. 이 변형량은 주사형터널링현미경으로 측정하여 높이정보를 산출하게 된다.

표면의 형상을 측정하는 방법은 주사형터널링현미경과 같이 일정전류모드와 일정전압모드로 할 수 있다. 일정전류모드는 탐침이 부착된 외팔보스프링을 시편에 접근시켜 반발력에 의한 변형이 발생하는 영역으로 접근시킨다. 외팔보의 변형량이 일정하도록 터널링전류를 제어하여 Z축을 제어하며, XY축으로 주사하여 면의 형상을

측정한다. 일정전압모드는 탐침이 부착된 외팔보스프링을 원자간력에 의해 변형이 발생하는 위치에 근접시키고 주사형터널링현미경으로 전류변화를 측정하여 형상을 산출하는 것이다.

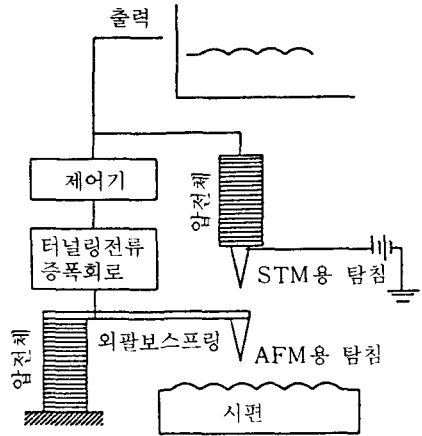


그림11 원자간력현미경의 원리도

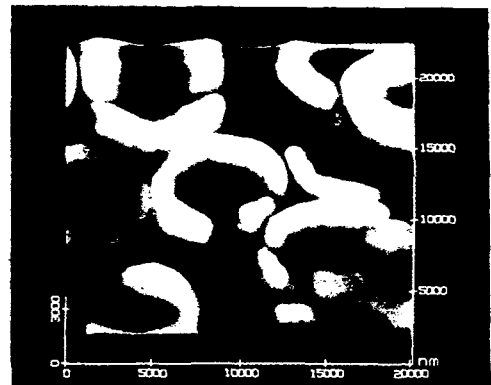
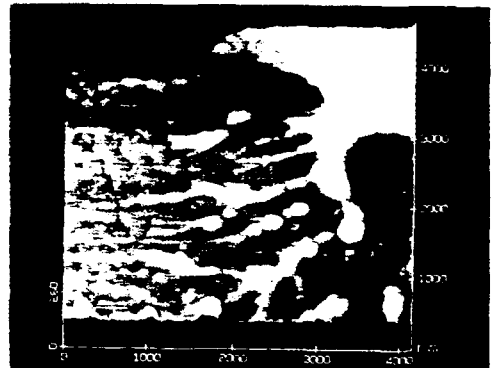


그림12 원자간력현미경을 이용한 측정에

이 측정시스템은 주사터널링현미경과는 달리 전도체나 비도체의 표면을 모두 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어, 비도체 형상측정에 편리한 측정이다. 한 예로 그림 12(a), (b)는 원자간력현미경을 이용하여 측정된 PMMA상에 광중합코팅(photopolymerized coating)된 면의 경계영역과 적혈구의 형상을 보여준다. 비도체 표면인 이들 모드는 원자크기정도의 분해능을 갖고 측정된 것이다. 이와같이 원자간력현미경은 측정원리가 갖는 장점으로 인해 원자형상은 물론 반도체형상과 같이 정밀한 측정을 요하는 비도체표면 측정에 많이 응용되고 있다⁽¹⁰⁾.

5. 결 론

산업기술의 발달에 따라 요구되는 부품의 정밀도는 점점 증가되고 있고, 이에 따른 측정도 점점 더 중요하게 대두되고 있다. 이러한 측정은 현재 초정밀 측정수준에서 행해지고 있다. 여기서는 이러한 수준에서 이루어지고 있는 비접촉식 측정방법으로 광학적 방법이 도입된 표면측정방법과 물리학적 원리가 응용된 표면측정방법이 소개되었다.

광학을 이용한 측정방법은 기계, 전자, 반도체, 컴퓨터 등의 정밀부품에 대한 길이, 압력, 미소변형, 표면평가등 산업계 전분야에 다양하게 사용되고 있으며 향후 광전자기술 및 컴퓨터기술의 발전과 다양한 광학부품 및 레이저의 출현으로 더욱 응용범위가 확대될 것으로 기대된다. 또한, 터널링 효과와 원자간의 반발력을 이용한 측정은 원자크기정도의 정밀측정을 요하는 작은 영역의 측정에 한정되고 있지만, 앞으로는 측정범위를 보다 확장시켜 넓은 영역에서도 이러한 측정정밀도를 갖는 고속측정이 이루어질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 塚田忠夫, "形状及び表面粗ち測定における非接觸

高精度化", 精密機械, 51, 4, 1985, pp.663
 2. L.H Tanner, "The use of laser light in the study of metal surfaces", Optics and Laser Technology, June 1976, p.113
 3. R. Smyte and R. Moore, "Instantaneous phase measuring interferometry", Opt. Eng., 1984, pp.361
 4. G. Binning and H. Rohrer, "Scanning Tunneling Microscopy", Sur. Sci. 126, 1983, pp.236
 5. J. Simmons, "Generalized Formula for The Electric Tunnel Effect between Similar Electronics Separated by A Thin Insulating Film", J. Appl. Phys. 34, 1963, pp.1793
 6. V.M. Hallmark, S. Chiang, J.F. Rabott, J.D. Swalen and R.J. Wilson, "Observation of Atomic Corragation on Au(111) by Scanning Tunneling Microscopy", Phys. Rev. Lett. 59, 1987, pp.2879
 7. R.D. Edstron, M.H. Meinke, X. Yang, R. Yang and D.F. Evans, "Scanning Tunneling Microscopy of The Enzymes of Muscle Gloycogenolysis", Ultramicroscopy 33, 1990, pp.99
 8. D.R. Denley, "Practical application of scanning tunneling microscopy", Ultramicroscopy 33, 1990, pp.83~92
 9. R.C. Barrett and C.F. Quale, "High-speed, large-scale imaging with the atomic force microscope", J. Vac., Sci. Technol. B 9 (12) Mar/Apr, 1991, pp.302
 10. 森田, 清三, "주사터널링현미경의 측정원리와 실제", 機械と工具, 1987, pp.302