

# 반도체 생산에서 초정밀 길이 측정

김 승 우

## Precision Measurements for Integrated-Circuit Fabrication

Seung-Woo Kim



- 김승우 (KAIST 정밀공학과)
- 1955년생.
- 기계시스템 설계를 전공하였으며, 초정밀 측정의 기본원리 및 측정시스템의 설계 제작에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

오늘날의 반도체 생산기술의 발전은 반도체 회로패턴의 고집적화 추세로 대변된다.<sup>(1)</sup> 그림 1은 반도체 메모리 칩의 경우에서의 회로패턴상의 소자크기 (feature size)의 축소화 경향을 보여주고 있다. 이미 1M DRAM을 기점으로  $1\mu\text{m}$  이하의 단위에 돌입하였으며 차세대의 256M와 1G DRAM에서는  $0.2\mu\text{m}$ 에 접근할 것으로 예측되고 있다. 이러한 정밀한 가공을 실현하기 위해서 많은 특수가공기술과 함께 이를 뒷받침할 수 있는 길이측정기술의 개발이 진행되고 있다. 반도체 생산을 위한 길이측정의 경우 전체적인 성능 분해능이  $\mu\text{m}$  이하 nm에 이르는 초정밀을 구현하여야 하는 필요성을 갖는다. 이러한 이유로 종래의 기계 또는 전기식 측정원리를 벗어나 새로운 광학기술의 도입과 컴퓨터를 이용한 신호처리의 기술이 폭넓게 응용되고 있다.

반도체에서의 길이측정은 그림 2에서와 같

이 변위측정 (displacement measurement)과 표면측정 (surface metrology)으로 대별된다.<sup>(2)</sup> 변위측정은 물체의 상대적 이동거리를 측정하는데 관련되며 반도체의 회로소자크기 (feature size)를 축소화하여 집적도를 높이기 위한 웨이퍼와 마스크의 위치제어와 직접

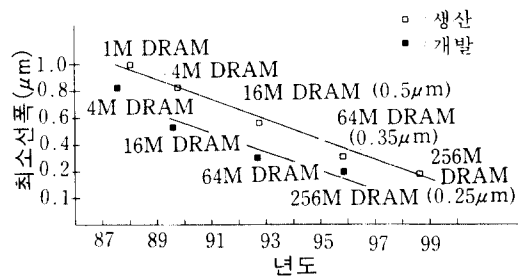


그림 1 반도체 집적도와 선포의 관계

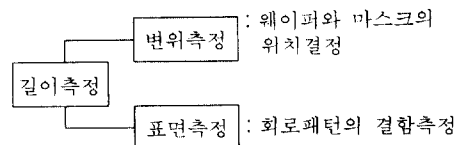


그림 2 반도체 생산에서의 길이 측정

적으로 연계된다. 또한 표면측정은 가공된 웨이퍼상의 회로패턴의 가공 전후에서의 삼차원 형상측정에 요구된다. 이들 길이측정들을 실현하는 데에는 광학기술이 적극적으로 활용되고 있으며 최근에는 물리학의 원리들이 도입되고 있다. 이 글에서는 이러한 측정 기술들의 기본 원리를 소개하고 각 기술이 갖는 장단점과 한계에 대해 기술한다.

## 2. 변위측정

반도체 생산에서의 변위측정은 회로패턴을 탑재한 웨이퍼와 마스크의 위치결정제어를 위해 요구된다. 회로패턴의 소자크기가 축소될수록 이에 비례한 위치결정 정밀도가 요구되며 정량적으로는  $0.1\mu\text{m}$ 의 패턴을 가공하기 위해서는 이보다 한 차수 낮은  $0.01\mu\text{m}$ 의 측정 분해능이 필요하다. 이 분야에서는 현재 파동광학원리가 주도적으로 사용되고 있으며 전체적으로  $0.001\mu\text{m}$  즉  $1\text{nm}$ 의 측정분해능이 실현되고 있다. 이 글에서는 변위측정기술의 근간을 이루는 마이클슨 위상간섭, 주파수 변환간섭, 그리고 회절간섭의 기본 원리를 기술한다.

### 2.1 마이클슨 위상간섭

광의 파동성을 이용한 변위측정방법으로 1900년도 초반 마이클슨(Michelson)에 의해 최초로 제안되었다. 이의 기본 원리는 그림 3에 보인 바와 같다.<sup>(3)</sup> 동일한 위상과 파장을 갖는 하나의 광원으로부터 생성된 광속을 광분할기 S를 이용해 두 개의 광속으로 분리한다. 이중 하나는 기준광속으로 사용되며 광분할기로부터 일정한 거리에 고정된 거울 M1로부터 투사된 후 반사되어 회수된다. 반면 다른 광속은 측정광속으로 측정의 대상이 되는 움직이는 물체상에 위치한 거울 M2로부터 반사되어 기준광속과 다시 합성된다. 이 때 합성된 광속 내에서 기준광속은 항상 일정한 위상을 갖는 반면 측정광속은 물체의

거리에 따라 변화하는 위상을 갖는다. 결과적으로 합성된 광속은 기준광속과 측정광속이 갖는 위상 차이에 의해 간섭효과를 갖게 되며 이를 수광소자를 이용하여 측정하면 다음의 강도식으로 표현된다.

$$I = I_{\max} \cos^2(2\pi/\lambda)x \quad (1)$$

그림 3에서와 같이 합성된 광의 강도는 거울 M2의 변위 X에 대해 주기적인 변화를 갖게 되며 강도를 측정함으로써 물체의 변위 X를 측정하게 된다. 마이클슨 간섭계는 간단히 구현될 수 있는 장점을 갖고 있으나 현재에는 널리 사용되고 있지 않고 있다. 이의 주된 이유는 변위와 강도가 식 (1)에서와 같이 비선형적인 관계를 갖고 있어 변위 산출의 분해능이 감소되며, 강도의 변화가  $\lambda/2$ 의 주기성을 갖고 있어 큰 변위를 산출하는 데에는 특별한 고려가 요구되는 문제점에 기인한다. 또한 사용되는 광원의 파장  $\lambda$ 이 일반적으로 측정중 대기의 온도, 압력, 습도 등에 따라 변화하는 특성을 갖고 있어 정밀한 측정을 위해서는 특별한 환경제어와 보정과정이 요구된다.

### 2.2 주파수 변환간섭

주파수변환 간섭계는 마이클슨 위상간섭계가 갖는 문제점을 개선하기 위해 1970년도 미국의 Hewlett-Packard의 엔지니어에 의해 제안되어 현재 가장 광범위하게 사용되고

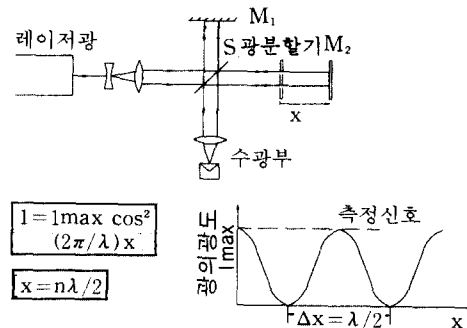


그림 3 마이클슨 위상간섭계의 기본 원리

있는 변위측정원리이다. 이는 변위측정에서 위상간섭이 아닌 주파수변환의 원리를 이용하며, 이의 출현에는 두 개의 주파수 성분을 갖는 이중 광원의 개발과 디지털 신호처리의 도입이 기초가 되었다. 주파수 변환간섭에 의한 변위 측정의 가장 단순한 형태로 선형 변위 (linear displacement) 간섭계를 들 수 있다. 이는 그림 4에서와 같이 편광레이저 광원, 편광광분할기, 그리고 코너반사경으로 구성된 광학계가 사용된다. 광원은 두 개의 유사한 주파수  $f_1$  과  $f_2$  로 합성된 편광 HeNe 레이저 광속을 출력하며, 이중  $f_1$  성분은 p-편광 그리고  $f_2$  성분은 s-편광되어 있다. 두 주파수의 차이는 3MHz의 범위로 합성된 광속의 주파수 차이는 고속 수광소자에 의해 손쉽게 감지될 수 있다. 광원에서부터의 광속이 그림 4에서와 같이 편광광분할기에 도달하면 p-편광성분은 통과하는 반면 s-편광성분은 반사하게 된다. 이중 p-편광성분은

측정광속으로 s-편광성분은 기준광속으로 이용된다. s-편광성분은 일정한 거리에 고정된 코너반사경에 의해 다시 편광광분할기로 되돌아오며, p-편광성분은 이동하는 물체에 부착된 코너반사경에 의해 다시 s-편광성분과 합성된다. 이 때 p-편광성분은 도플러효과 (Doppler's effect)에 의해 물체가 움직이는 속도에 비례하는 양만큼 주파수가 변화하게 된다. 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f_1 \propto \dot{x} \quad (2)$$

이 때의 주파수 변화량  $\Delta f_1$ 은 그림 4에서와 같이 간섭전과 후에 합성된 광속 내에서 고속의 수광소자를 이용하여 측정될 수 있다. 최종적으로 물체의 변위는 식 (2)의 주파수 변화량을 디지털 회로를 통하여 적분하여 얻게 된다. 초기의 설계된 제품에서는 0.01마이크론의 분해능을 얻었으나 최근에는 평면거울 (plain mirror) 간섭계와 차등변위

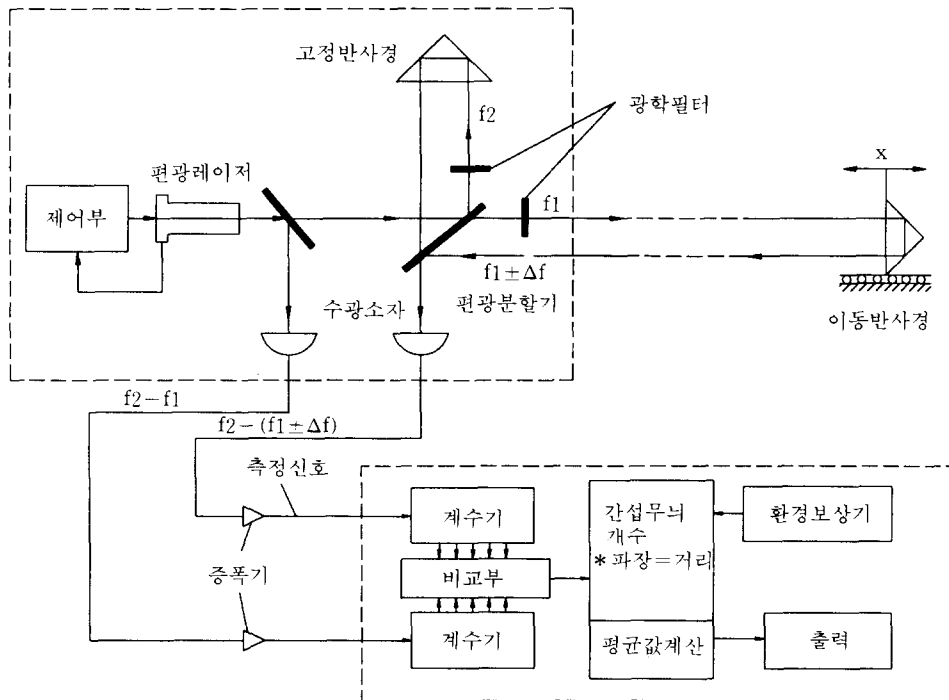


그림 4 주파수변환 간섭계

거울(differential plane mirror) 간섭계가 개발되어 1나노미터의 분해능에 접근하고 있다.<sup>(4)</sup> 주파수 변환간섭계가 갖는 장점은 마이클슨 간섭계와는 달리 측정량과 변위량이 선형관계를 유지하여 높은 분해능을 얻을 수 있을 뿐 아니라 측정거리도 수십 미터에 이르고 있어 많은 응용의 장점을 부여하고 있다. 그러나 사용되는 광원의 파장이 주변 대기의 변화에 여전히 민감하므로 특별한 주의가 요구된다.

### 2.3 회절간섭

회절 간섭(diffraction interferometer)에 의한 변위측정은 가장 최근인 1980년 말에 실용화되었다. 이는 주파수 변환간섭계가 갖는 단점인 주변환경에 따른 광원의 파장의 변화에 의한 측정정밀도 감소의 문제점을 극복하기 위한 개선방법으로 주목을 받고 있다. 이의 기본 작동원리는 그림 5에 보인 바와 같다.<sup>(5)</sup> 미소 격자가 식각된 표면 위에 레이저광을 주사한 후 이로부터 회절되는 광속들 간의 파동간섭에 의한 강도변화를 이용한다. 그림 5에서와 같이 반사형 격자(reflection grating)에 파장이  $\lambda$ 인 단색광을 수직입사시켜 회절각  $\beta$ 로  $\pm m$ 차수의 광이 반사회절하도록 한다. 이 때 임의점 C에서의  $\pm m$ 차수의 광에 대한 위상간섭은 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta\phi_c = -2\pi \frac{AN}{(d/2m)} \quad (3)$$

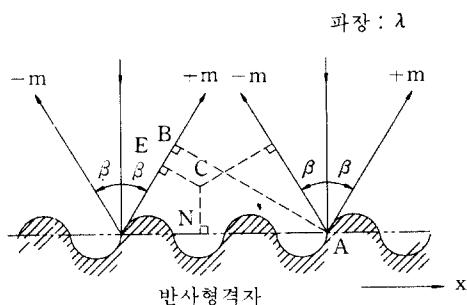


그림 5 반사형 격자에 의한 회절

여기서  $d$ 는 격자의 피치를 의미한다. 격자가 X방향으로 이동하면 점 C에 있어서 양(兩)회절광의 위상차에 변화를 주며, 그 위상차 변화는  $d/2m$ 를 주기로 반복된다. 그림 6은 이상의 회절간섭을 측정에 이용한 광학계를 보여준다. 점광원으로부터의 단색광을 집광렌즈에 의해 평행광으로 만들어 반사형격자에 수직방향으로 입사시킨다. 여기서 회절시킨  $\pm 1$ 차수의 회절광 a, b를 서로 평행한 반사경에 의해 반사시킨 후 분광기를 이용하여 합성간섭시키며 이 때 얻어지는 명암의 간섭광을 수광소자를 이용하여 검출한다. 현재 공학적으로 실용화된 회절간섭계의 경우 1나노미터의 안정된 분해능을 갖고 있으며 대기의 변화에 비교적 안정된 장점을 갖고 있다. 단, 회절격자가 부착된 판을 제작하는 생산기술에 의해 현재 전체 측정범위가 수십 밀리미터로 제한되고 있으나 앞으로 수십 센티미터까지 확장될 것으로 예측된다.

### 3. 표면측정

반도체 회로패턴의 고집적화와 더불어 중요성이 강조되고 있는 측정분야가 표면측정이다. 이의 주된 용도는 웨이퍼의 평면도나 회로패턴의 선폭의 형상을 추출하는 데 있으며 반도체 수율과 직접적으로 연계되는 이물질의 유무를 판정하는데 이용된다. 이를 위해서는 고정밀의 분해능이 요구되어 광학뿐 아니라 기계식 그리고 새로운 물리학의 원리

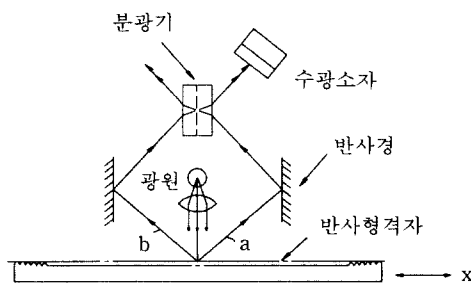


그림 6 기본 광학계

들이 이용되고 있으며, 고속의 측정결과를 처리하기 위해 컴퓨터의 응용이 활발히 진행되고 있다.

### 3.1 촉침식

이는 기계식 측정원리로 기계표면의 측정을 위해 최초로 개발된 접촉식 원리를 이용한다.<sup>(6)</sup> 그림 7에서와 같이 미세 반경을 갖는 다이아몬드 촉침(stylus)을 제작한 후, 이를 측정 표면상을 주사이동하게 하여 이때 표면의 요철에 따른 촉침의 상하운동을 고성능 변위센서를 이용하여 표면형상을 측정한다. 레이저 변위계나 정전형 변위계를 사용하는 경우 측정의 수직분해능을 1나노미터의 범위까지 접근시킬 수 있다. 반면 수평분해능은 촉침의 반경에 의해 제한되며 실제적으로 0.1마이크로미터의 수준까지는 기술적으로 큰 어려움 없이 가능하다. 이 방법을 반도체 측정에 응용할 때에는 촉침이 측정시편에 접촉하면서 시편에 손상을 입힐 수 있으므로 접촉 압력의 조절에 특별한 주의가 필요하다. 삼차원 형상 측정을 위해서는 촉침을 시편상의 일정한 면적에 등간격으로 반복적으로 측정하는 관계로 장시간의 측정이 소요된다.

### 3.2 광위상간섭

광위상간섭(phase-shifting interferometer)은 광이 갖는 파동성질에 의한 간섭의 원리와 컴퓨터를 이용한 고속의 신호처리 기술을 표면측정에 이용한다.<sup>(7~9)</sup> 그림 8에서와 같이 단색 광원으로부터 얻은 위상이 동일한 같은 평행광속을 일정 반경의 단면 크기로 확대한 후 분광기에 의해 기준광속과 측정광속으로 분리한다. 이 두 광속을 기준표면과 측정 표면에 각각 입사시킨 후 반사되어 오는 광속을 다시 광분할기에 의해 합성한다. 이 때 기준표면으로부터 반사하는 광속은 일정한 위상의 파두면을 갖는 반면 측정표면으로부터의 광속은 표면상의 요철에 의한 위상변화

를 갖는다. 그러므로 합성되는 광속의 단면상의 파두면은 위상변화에 의한 간섭이 발생하며, 간섭무늬의 강도패턴은 측정표면의 높이분포  $h(x, y)$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$I(x, y) = I_0(1 + \gamma \cos(\frac{2\phi}{\lambda} h(x, y))) \quad (4)$$

이러한 간섭무늬를 배열감광센서에 의해 측정된 후 컴퓨터를 이용한 디지털 영상처리 기술을 도입하여 측정표면의 삼차원 형상을 추출한다. 이 방법은 촉침식방법과 비교하여 고속의 삼차원형상측정을 실현할 수 있는 장점을 갖는다. 측정의 수직분해능은 1나노미터의 수준에 이르며 수평분해능은 광의 회절현상에 의해 1마이크론으로 제한된다.

### 3.3 주사식 광학현미경

주사식 광학현미경(scanning optical microscope)은 일반 광학현미경에 자동 초점조절 기능을 부여하여 측정표면에 대해 주사식으로 표면형상을 추출한다.<sup>(10,11)</sup> 그림 9에서와 같이 레이저광선을 물체상에 집광렌즈를

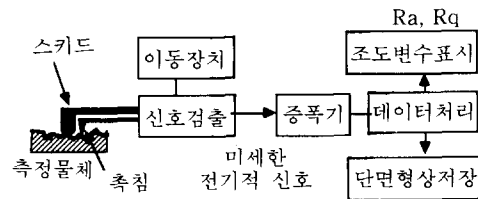


그림 7 촉침식 표면 측정 시스템

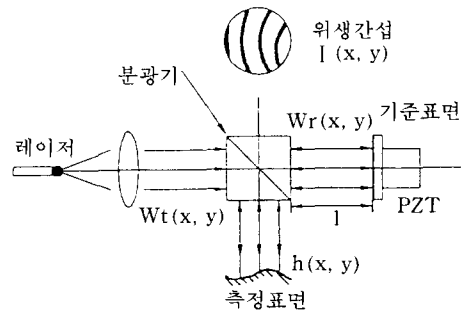


그림 8 트위만-그린 간섭계의 기본 원리

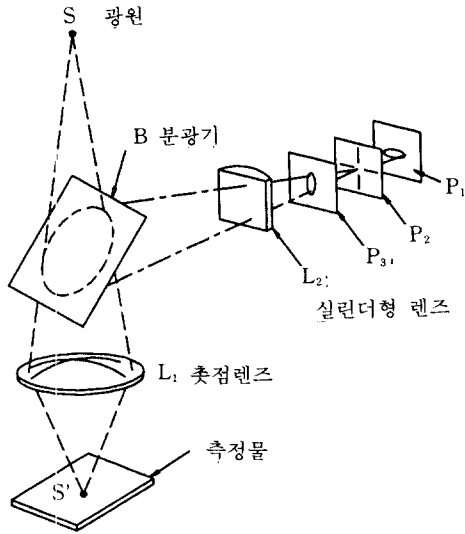


그림 9 주사식 광학현미경의 자동초점 조절장치

통해 주사한 후 초점결정 상황을 실린더 렌즈를 포함한 수광부에서 감지한다. 주사중 물체표면의 요철에 의해 초점결정 상태가 변화하면 압전구동기나 전자식 구동기에 의해 집광렌즈의 위치를 연속적으로 조정하여 항상 초점결정 상태가 일정하도록 제어한다. 표면의 주사가 완료되면 주사중 구동기에 인가하였던 입력전압으로부터 간접적으로 표면의 삼차원형상을 추출한다. 이 방법은 비교적 단순한 광학계를 이용할 수 있는 장점을 갖고 있으며 표면의 삼차원 형상 측정뿐 아니라 표면에 존재하는 이물질의 유무감별에도 효과적으로 적용될 수 있다. 반면, 다른 방법에 비교하여 광의 회절현상에 의해 수직과 수평 방향의 분해능이 마이크로미터 범위로 초정밀측정에는 사용이 제한되는 단점을 갖는다.

### 3.4 광산란

광산란(light scattering)을 이용한 표면측정은 그림 10에서와 같이 표면에서의 빛의 산란정도를 측정하는 데에 이용한다.<sup>(12)</sup> 여러 가지 방법들이 연구개발되고 있으며 이들 중

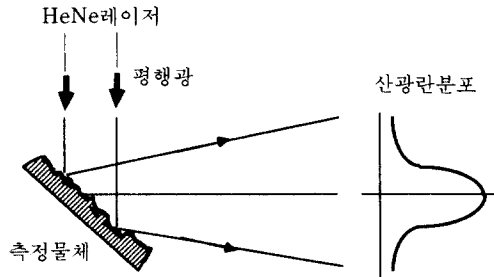


그림 10 광산란을 이용한 기본 측정 원리

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. 광산란 방법은 측정표면의 형상을 직접적으로 측정하지 않고 산란된 빛의 분포로부터 표면용 정의하기 위해 사용되는 조도변수들을 산출하여 평가한다. 이러한 이유로 그 본질적인 특성상 광산란현상과 표면거칠기 사이에 일대일 대응관계가 성립되지 않으므로 표면을 평가하기 위해서는 표면의 미세형상에 대한 정보가 반드시 요구된다. 특히 이 방법은 웨이퍼 상에 존재하는 이물질의 고속 판별에 대단히 효과적으로 생산라인에서 널리 활용되고 있다.

### 3.5 주사식 터널링 현미경

이는 1980년대 초부터 실용화되어 최근에 표면측정에 고도의 분해능을 구현할 수 있는 방법으로 각광받고 있다. 이의 기본 원리는 양자역학에서 설명되는 터널링 효과(tunneling effect)를 표면측정에 구현한다.<sup>(13~15)</sup> 그림 11에서와 같이 얇은 절연층으로 분리된 두 도체를 나노미터의 수준으로 근접시킬 경우 전자의 파동적 성질과 불확정성의 원리에 근거하여 도체 내의 전자가 절연층을 투과하게 된다. 실제 측정에서는 탐침(tip)과 시편(specimen) 사이에 전자가 활성화될 수 있

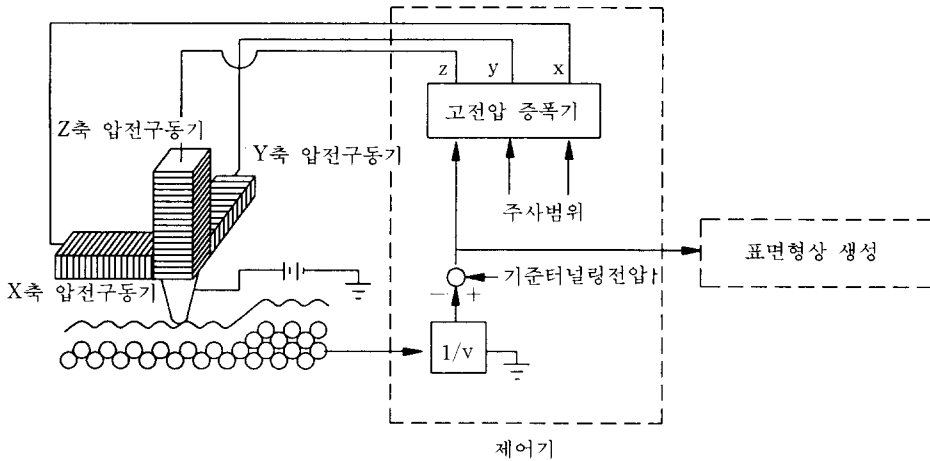


그림 11 주사식 터널링 현미경의 측정원리

는 수십 mV의 전압을 걸어주고 절연층의 두께를 터널링효과가 일어날 수 있는 수 Å으로 유지할 때 약 1 nA의 터널링전류(tunneling current)가 흐르게 된다. 이때 터널링전류( $I_t$ )는 절연층의 두께 즉 시편과 탐침 사이의 거리( $d$ )에 다음과 같이 지수함수적으로 반비례하게 된다.

$$I_t \propto \frac{V}{d} e^{-2\kappa d} \quad (5)$$

여기서,  $V$ 는 인가전압을 나타낸다.

즉, 터널링전류는 거리변화에 민감하게 되며 이를 이용할 경우 Å단위의 분해능으로 표면의 요철상태를 측정할 수 있다. 삼차원 측정을 위해서는 압전구동기를 이용하여 탐침을 표면에 일정한 간격으로 추적(track)하면서 표면을 주사(scanning)한다. 이때 압전구동기에 가한 전압을 역으로 환산하여 표면의 원자 분포나 형상을 측정하게 되며 고체원자의 크기까지 관찰할 수 있는 높은 분해능을 실현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 반면 이는 측정표면이 도체에 한정되는 제한을 갖고 있어 웨이퍼의 측정에서는 표면을 도체로 도포하여야 하는 번거러움을 갖는다.

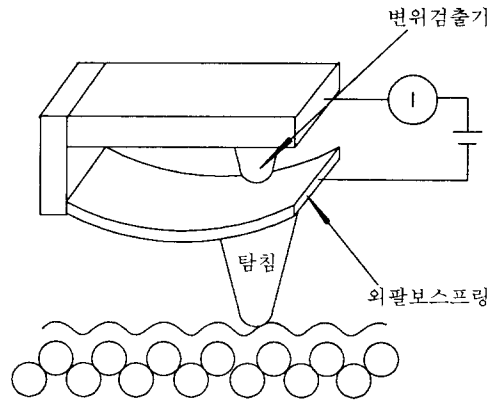


그림 12 원자간력 현미경의 측정원리

### 3.6 원자간력 현미경

원자간력 현미경(atomic force microscope)은 가장 최근에 개발되기 시작한 방법으로 주사식 터널링 현미경이 갖는 제한점을 극복하여 부도체인 표면을 직접적인 대상으로 하고 있다.<sup>(16,17)</sup> 측정원리는 그림 12에 도시된 바와 같이 탐침의 선단원자와 시편표면의 원자들 사이에 작용하는 힘을 외팔보스프링을 이용하여 변위로 검출한다. 원자간력 현미경은 측침식(stylus)과 유사하게 시편표면과 일종의 접촉이 일어나지만 추적력(track

force)이 촉침식의 백만분의 일 정도이므로 시편표면에 손상을 발생시키지 않는다. 또한 날카롭게 제작된 탐침선단의 단원자와 표면의 원자 사이에 작용하는 힘을 기록할 수 있다. 원자 사이에 작용하는 힘은 약  $10^{-9}$ N 정도이므로 외팔보스프링의 상수는 약 1N/m 정도로 민감하게 특수 제작된다. 미소변위 검출기로서 공간섭계(optical interference)나 레이저 변위계(deflection of laser-light beam)나 터널링 전류(tunneling current)가 현재 이용되고 있다. 변위 검출기로서 터널링 전류를 사용할 때 주사형 터널링 현미경과 매우 유사한 측정 형태를 갖게 된다. 측정 방법은 원자간력을 일정하게 추적(tracking)하면서 표면을 주사(scanning)하여 시편표면의 원자분포나 형상을 측정하게 된다.

#### 4. 맺음말

이 글에서는 현재 반도체 생산과 연계된 길이 측정 기술을 변위 측정과 표면 측정으로 대별하여 이에 이용되고 있는 대표적인 방법들의 기본 원리와 장단점을 기술하였다. 반도체 분야의 길이 측정은 1나노미터 수준의 초정밀 분해능을 요구하고 있어 이를 구현하기 위해 광학과 물리학의 기본 원리들이 측정에 실제적으로 폭넓게 적용되고 있다. 또한 측정의 고속화와 측정 결과의 효율적인 처리를 위해 컴퓨터의 활용이 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. 지면 관계로 인해 세부적인 서술은 생략하였으니 첨부된 참고문헌을 활용하기 바란다.

#### 참고문헌

- (1) 한국반도체연구조합, 1992, "21세기 선도기술 개발사업(HAN Project)-초고집적 반도체 (256M DRAM) 연구기획".
- (2) Abe, T., Steigmeier, E. F., Hagleitner, W. and Pidduck, A. J., 1992, "Microroughness Measurements on Polished Silicon Wafers," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 13, pp. 721~728.
- (3) Weck, M., 1984, Handbook on Machine Tools; Vol. 4-Metrological Analysis and Performance Tests, John Wiley & Sons.
- (4) Slocum, A. H., 1991, Precision Machine Design, Prentice Hall.
- (5) Shigeo Mariyama and Tatauo Harada, 1983, "A Precision Displacement Using a Diffraction Grating," 精密機械, 第49卷, 第6號, pp. 94~99.
- (6) 임동열, 박현구, 김승우, 1989, "이동식 촉침형 조도 측정기를 이용한 디지털 표면 평가 시스템," 대한기계학회 춘계 학술대회 초록집 (I), pp. 395~399.
- (7) 김승우, 공인복, 민선규, 1992, "광위상 간섭에 의한 경면의 정밀형상 측정," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제8호, pp. 1530~1535.
- (8) Bruning, J. H. and Herriott, D. R., 1974, "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," Appl. Opt., Vol. 13, No. 11, pp. 2693~2703.
- (9) Moore, D. T., Murray, R. and Neves, F. B., 1978, "Large Aperture AC Interferometer for Optical Testing," Appl. Opt., Vol. 17, No. 24, pp. 3959~3963.
- (10) Whitehouse, D. J., 1987, "Instrument Science and Technology," J. Phys. E: Sci. Instrum. 20, pp. 1145~1155.
- (11) Wagner, W., Dändliker, R. and Spenner, K., Sensors-A Comprehensive Survey, Volume 1, Optical Sensors, pp. 560~562.
- (12) 임동열, 1991, "정밀가공표면의 광학적 비접촉식 인프로세스 표면 평가," 박사학위 논문, 한국과학기술원.
- (13) Sherrington, I. and Smith, E. H., 1988,



- "Modern Measurement Techniques in Surface Metrology: Part II; Optical Instruments," *Wear*, Vol. 125, pp. 289~308.
- (14) Binnig, G. and Rohrer, H., 1983, "Scanning Tunneling Microscopy," *Sur. Sci.* 126, pp. 236~244.
- (15) Hallmark, V. M., Chiang, S., Rabott, J. F., Swalen, J. D. and Wilson, R. J., 1987, "Observation of Atomic Corrugation on Au(111) by Scanning Tunneling Microscopy," *Phys. Rev. Lett.* 59, pp. 2879~2882.
- (16) Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C., 1986, "Atomic Force Microscope," *Phys. Rev. Lett.* 56, pp. 930~933.
- (17) Martin, Y., Williams, C. C. and Wickramasinghe, H. K., 1987, "Atomic Force Microscopy-Force Mapping and Profiling on a Sub 100 Å Scale," *J. Appl. Phys.* 61, pp. 4723~4729. 