

〈論 文〉

터널링효과를 이용한 초미세 가공표면의 형상측정

정승배* · 이용호** · 김승우*

(1993년 1월 6일 접수)

Profile Measurements of Micro-Machined Surfaces by Scanning Tunneling Microscopy

Seung-Bae Jung, Young-Ho Lee and Seung-Woo Kim

Key Words : Scanning Tunneling Microscopy(주사형터널링현미경), 3-Dimensional Profile Measurement(삼차원 형상측정), Critical Dimension of Macro-Machined Pattern(미세가공된 패턴의 최소선폭), Piezoelectric Actuators(압전구동기), Precision Surface Metrology(정밀 표면측정)

Abstract

An application of Scanning Tunneling Microscopy(STM) is investigated for the measurement of 3-dimensional profiles of the macro-machined patterns of which critical dimensions lie in the range of submicrometers. Special emphasis of this investigation is given to extending the measuring ranges of STM upto the order of several micrometers while maintaining superb nanometer measuring resolution. This is accomplished by correcting hysteresis effects of piezoelectric actuators by using non-linear compensation models. Detailed aspects of design and control of a prototype measurement system are described with some actual measuring examples in which fine IC patterns can successfully be traced with a resolution of 1 nanometer over a surface range of 4x2 micrometers.

1. 서 론

반도체칩 내부의 회로패턴의 형상은 집적도의 고도화를 위한 제반 특수 가공기술의 발전에 의해 점점 미세화되어 가고 있다. 회로패턴의 수직방향 가공은 이미 수 나노미터 수준에 이르고 있으며, 수평방향으로는 메모리칩의 경우 1M DRAM을 기점으로 1 μm 이하의 최소선폭(critical dimension)에 이르러 향후 256M과 1G DRAM에서는 0.1 μm 범위로 정밀화될 것으로 예측되고 있다.⁽¹⁾ 이렇게 미

세한 치수를 갖는 반도체 회로패턴 대한 삼차원 형상측정 기술은 나노미터 측정분해능을 갖추어야 하며 이와 더불어 측정범위는 최소한 수 마이크로미터를 유지하여야 한다.

현재 집적 회로패턴의 삼차원측정을 위해 사용될 수 있는 방법으로 축침식(stylus method),⁽²⁾ 광위상간섭(phase shifting interferometry),⁽³⁾ 그리고 주사전자현미경(scanning electron microscopy)⁽⁴⁾을 들 수 있다. 그러나 이들 기존의 측정방법들은 최소선폭이 0.1 μm 이하로 축소될 경우 측정분해능이 최소한계에 달하거나 측정방법이 갖는 근본적인 한계로 인해 사용이 어렵게 된다. 축침식의 경우 축침이 갖는 유한한 반경 이하의 미세 형상이 측정

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**한국과학기술원 정밀공학과

이 불가능하며, 동시에 축침과 표면이 접촉되어 측정표면에 손상이 발생하는 문제점을 갖는다. 광위상간섭에서는 비접촉측정이 가능하나 수평분해능이 1 μm 수준에 머무르는 한계를 갖는다. 또한 주사식전자현미경의 측정방법은 기본적으로 2차원 측정 원리에 근거하는 관계로 회로패턴의 높이방향 정보를 얻기 위해서는 단면을 절단하여야 하는 측정작업상의 한계를 갖고있다.

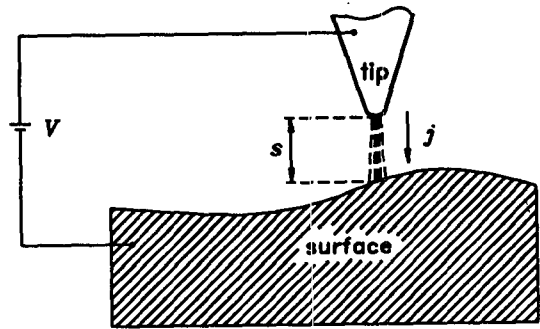
이러한 기존의 측정방법들이 갖는 한계점들을 극복하기 위해 본 연구에서는 주사터널링현미경(scanning tunneling microscopy)의 원리를 반도체 회로패턴의 측정에 적용하였다. 주사터널링현미경의 원리는 1982년 Binnig G.와 Bohrer H.⁽⁵⁾에 의해 최초로 실현되었으며 그후 고체결정의 원자구조 및 생물유전자의 측정에 급진적으로 응용되고 있다.^(6~11) 이 방법은 근본적으로 두 도체사이에 존재하는 터널링효과(tunneling effect)를 표면형상 측정에 이용한다. 미세반경을 갖는 탐침을 압전구동기(piezoelectric actuator)를 사용하여 측정표면으로부터 수십 Å범위내에 유지시키며 터널링효과에 의한 전류를 측정매체로 하여 측정표면을 주사하여 표면형상을 추출한다. 본 연구에서는 반도체 회로패턴을 측정하기 위한 주사터널링현미경 측정장치를 설계제작하였으며, 실제적인 실험결과로부터 반도체 회로패턴의 삼차원 형상측정을 나노미터의 분해능으로 측정할 수 있음을 입증하였다.

2. 터널링효과의 기본이론

터널링효과(tunneling effects)의 가능성은 1920년대 초반 Fowler와 Nordheim에 의해 처음 이론적으로 제시되었다.⁽¹²⁾ 이는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 두 도체가 격리되어 있음에도 불구하고 절연층의 두께가 충분히 얇을 경우 전류가 흐르게 되는 현상을 설명한다. 이때의 전류를 터널링전류(tunneling current)로 정의하며 이는 전자의 파동성과 불확정성 원리에 근거하여 설명될 수 있다. Simmons⁽¹³⁾는 터널링전류 j 와 두 도체사이와의 간격 s 와의 관계를 해석적으로 유도하였으며 이는 다음과 같이 요약될 수 있다, 즉

$$j = K \frac{V}{s} \exp(-2xs) \quad (1)$$

위식에서 V 는 두 도체사이에 인가된 전압을 의미



j : Current density by tunneling effect
 S : Effective tunneling distance
 V : Applied voltage

Fig. 1 Tunneling effects

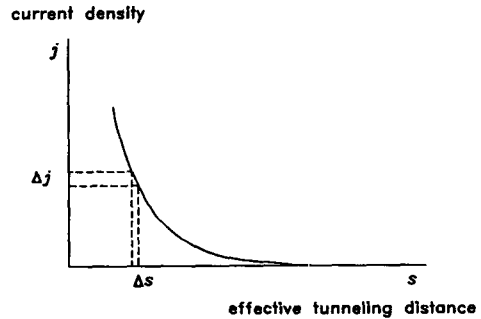


Fig. 2 Sensitivity of tunneling current to effective tunneling distance

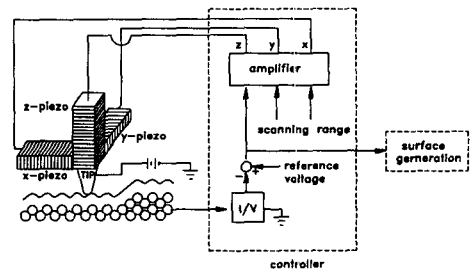


Fig. 3 Operational principles of scanning tunneling microscope

하며, K 와 x 는 물질상수들과 탐침의 형상에 의해 결정되는 상수들을 표현한다. 터널링전류 j 는 전압 V 에 비례하며 동시에 간격 s 에 대해 지수함수적으로 반비례함을 알 수 있다. Fig. 2는 전류밀도와 간격과의 정성적인 관계를 도식적으로 보여준다. 그림에서와 같이 터널링전류는 간극이 충분히 작은

범위에서의 간극의 변화에 대해 민감한 반응을 보이게 됨을 알 수 있다.

터널링효과를 이용한 표면측정은 Fig. 3에 보인 바와 같이 세 개의 미세구동기와 미세한 반경을 갖는 탐침을 이용한다. 탐침과 측정시편 사이에 일정 전압을 인가한 후 X와 Y축의 미세구동기를 작동하여 탐침으로 하여금 측정표면상의 비점축으로 주사(scanning)하게 제어한다. 이와 동시에 Z축의 미세구동기는 터널링전류가 항상 일정하게 유지되도록 탐침의 수직방향의 위치를 변화시키면서 탐침과 측정시편 사이의 거리를 비점축 상태에서 항상 일정하게 유지하게 한다. 결과적으로 측정표면의 삼차원 형상은 세 미소구동기에 입력된 전압으로부터 이에 대응되는 변위를 역으로 환산하여 추출하게 된다.

3. 주사터널링현미경 측정장치

본 연구에서 설계제작된 주사터널링현미경의 기계적 구조는 Fig. 4와 같이 압전구동기를 내장한 XYZ 세축으로 구성된다. 측정에 필요한 축침은 Z축에 수직으로 장착되며 측정시편은 X와 Y축상의 테이블에 수평으로 구성된다. 각축의 압전구동기는 두개의 판스프링의 탄성변형에 의해 직선운동(translatory motion)만을 하도록 각운동(angular

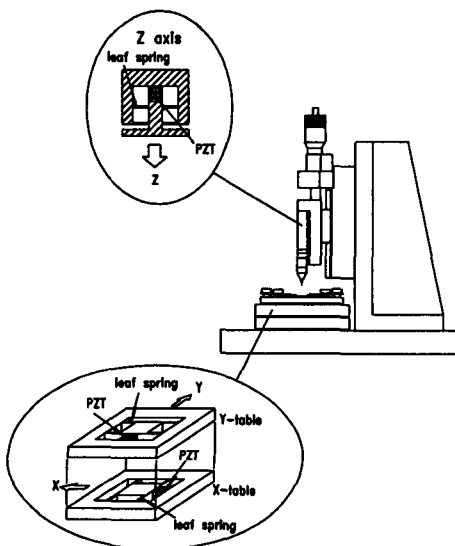


Fig. 4 Experimental setup for scanning tunneling microscope

Table 1 Characteristics of the piezoelectric actuators used in experiments

Sensitivity	6.5 $\mu\text{m}/100\text{ V}$
Maximum voltage	150 V
Resonant frequency	100 kHz
Capacitance	650 nF
Maximum displacement	9.75 μm

motion)이 억제된 상태로 구속되어 있다. 사용된 압전구동기는 적층형(stack type)으로 이의 세부적인 사양은 Table 1에 수록되어 있다. 전체적인 측정기는 외부로부터의 음향 및 구조적 진동교란을 차단하기 위해 잡음 차폐상자에 내장되어 3 Hz의 고유진동수를 갖는 방진테이블 위에 설치되었다.

측정에 요구되는 전기적인 제어는 Fig. 5와 같이 수행된다. 먼저 측정과 시편사이에 10~100 mV의 전압이 인가된다. 이때 $10^{-12}\sim 10^{-6}$ Ampere의 범위의 터널링전류가 유기되며 이는 외부교란 신호로부터 보호되어 전압신호로 변환된다. 이는 다시 차등증폭기(differential amplifier)에 의해 특정 기준전압(reference voltage)과 비교된 후 이들의 차는 적분제어기(integrator)를 통해 Z축 압전구동기에 입력된다. 이는 결과적으로 터널링전류를 항상 기준전압에 비례하는 일정한 값에 유지시키게 되며, 식(1)에서 제시된 바와 같이 Z축에 부착된 축침으로 하여금 시편과 항상 일정한 거리를 갖게 한다. 이러한 Z축에 대한 추적제어와 동시에 마이크로컴퓨터(IBM PC 386)는 X와 Y축의 압전구동기를 제어하여 측정시편이 축침에 대해 주사되도록 유지하면서 이와 동시에 터널링전류와 Z축 압전구동기의 제어전압을 입력한다.

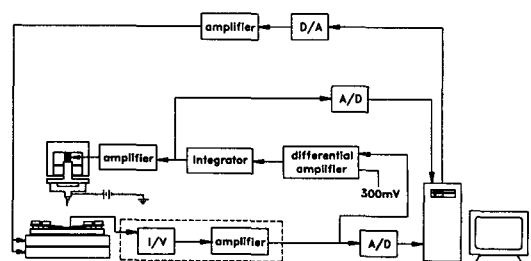
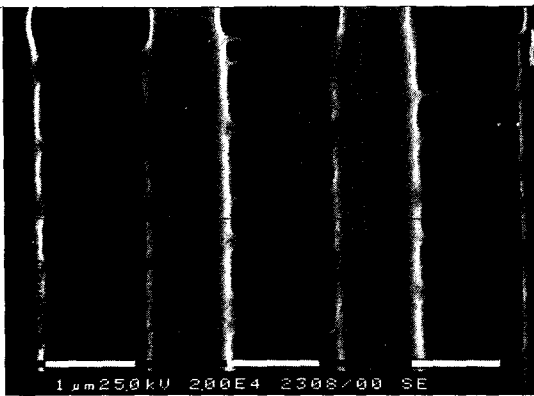


Fig. 5 Electrical control of scanning tunneling microscope



(a) Stylus tip



(b) Test surface pattern

Fig. 6 SEM(scanning electron microscope) potographs of stylus tip and test surface pattern

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 본 연구에 사용된 탐침과 시편의 주사전자현미경(SEM) 사진을 보여준다. 탐침은 0.5 mm 직경의 텅스텐 선을 30%의 KOH 용액을 사용하여 전기화학적 가공방법으로 측정부의 반경이 0.1 μm로 제작되었다. 시편은 유리의 기저(substrate)상에 구리박막을 입힌 후 1.0 μm의 선폭을 갖는 선을 1.0 μm 간격으로 이온빔 공정(ion beam lithography)을 사용하여 제작하였다. 측정에 삽입되는 시편은 표면에 전도성을 부여하기 위해 20 nm 두께의 금 박막을 화학적 증착공정(CVD: chemical vapor deposition)을 통해 도포하였다.

4. 주사 변위량 결정

주사터널링현미경 측정에서 시편의 삼차원 형상

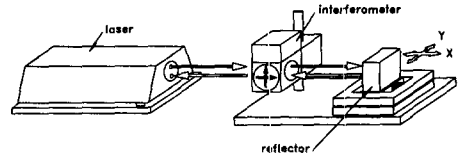


Fig. 7 Calibration measurement of piezoelectric actuators for scanning

은 앞절에서 기술한 추적주사 제어시에 컴퓨터에 입력된 X, Y, Z축 압전구동기들의 입력전압 신호로부터 계산된다. 이를 위해서는 각 압전구동기가 갖는 입력전압과 변위와의 정확한 상관관계가 요구된다. 가장 단순한 상관관계는 선형식으로 다음의 일차식을 사용하여 근사할 수 있다.

$$D = KV \tag{2}$$

여기서 D 와 V 는 각각 변위와 입력전압이며, K 는 비례상수를 의미한다. Fig. 7은 비례상수를 실험적으로 결정하기 위한 보정장치를 보여준다. 보정장치에는 HeNe 레이저인터페로미터(laser interferometer)가 사용되었으며 주어진 입력전압에 대한 압전구동기의 변위량이 10 nm의 분해능으로 측정되었다. Fig. 8(a), (b), (c)에는 X, Y, Z축 압전구동기의 정적변위 특성을 측정된 결과와 평균 민감도(sensitivity)로 계산된 비례상수가 각각 도시되어 있다. 그림에서와 같이 압전구동기는 무시할 수 없는 이력현상(hysteresis)에 의한 비선형 특성을 가지고 있어 단순한 선형식으로 간주될 경우 실제 상관관계와 많은 오차를 갖게됨을 알 수 있다. 예로 XYZ 축에 대한 식(2)의 일차 선형식의 근사는 Fig. 8로부터 최대 12.3%(0.713 μm/5.8 μm), 12.9%(0.77 μm/6.0 μm), 11.7%(0.725 μm/6.20 μm)의 오차를 수반하게 됨을 알 수 있다.

정확한 압전구동기의 관계식을 나타내기 위해서는 압전구동기의 비선형특성이 고려되어야 된다. 압전구동기의 비선형특성으로는 온도특성과 크립현상, 이력현상 등이 있다. 온도에 따른 비선형성은 측정 환경이 잘 제어된다는 가정하에, 크립현상은 짧은 시간안에 측정한다는 가정하에 이들 특성은 무시하였으며, 여기서는 비선형특성으로 이력현상만 고려하였다. 근사식을 유도하기 위한 측정실험은 20°C ± 1의 환경속에서 행해졌다. Fig. 9는 압전구동기의 비선형성을 고려한 근사식을 유도하기 위한 일반적인 전압-변위의 특성곡선을 보여 준다.

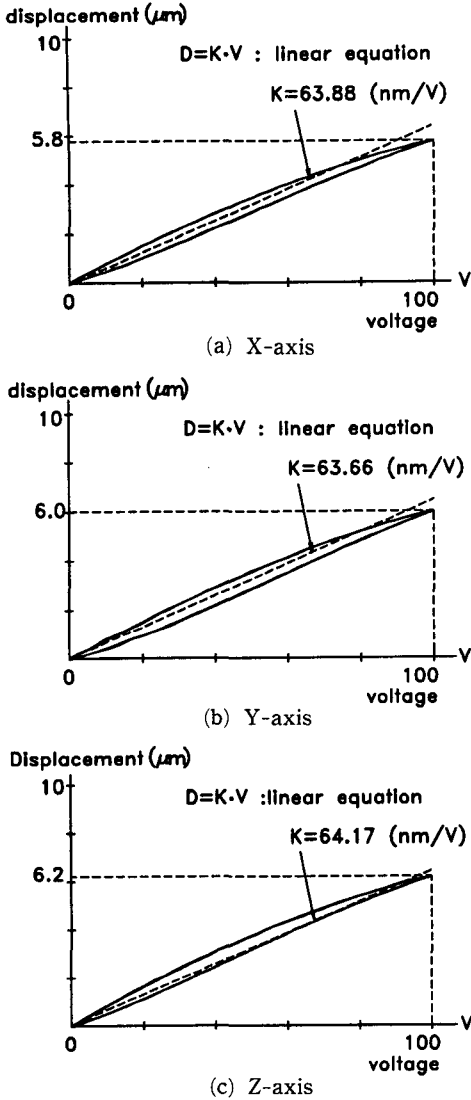


Fig. 8 Nonlinear effects and mean sensitivities of piezoelectric actuators

곡선 $H_f(V)$ 는 입력전압이 초기조건 0에서부터 포화전압 V_{max} 까지 증가할 경우의 변위경로를 나타낸다. 반면, 입력전압이 V_{max} 에서 반전하여 감소할 경우의 변위경로는 전과는 다른 새로운 곡선 $H_r(V)$ 를 따른다. 주어진 구동기에 대해 이들 두 경로곡선을 10회 반복하여 측정하여 본 결과 0.5% (약 30 nm) 이내의 반복능을 갖고 있는 것으로 측정되며 이들은 다음의 다항식으로 근사될 수 있다.

$$D = H_f(V) = \sum_{k=0}^n \alpha_k V^k \quad (3)$$

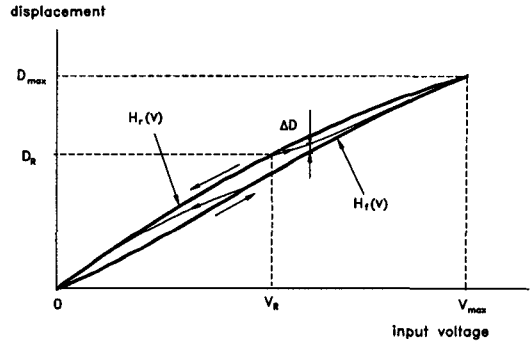


Fig. 9 Typical hysteresis characteristics of piezoelectric actuators

$$D = H_r(V) = \sum_{k=0}^l \beta_k V^k \quad (4)$$

여기서 α_k, β_k 는 최소자승법에 의해 구해지는 다항식 상수들을 의미한다. 본 연구에서 사용된 세계의 압전구동기에 대해 각각 3차 다항식까지 고려한 근사곡선을 사용한 경우의 상수들과 근사에 의한 오차를 Table 2에 수록하였다.

식(3)와 (4)으로 표현되는 근사곡선은 압전구동기의 입력전압과 변위의 모든 상황에서의 정밀한 관계를 의미하지는 않는다. Fig. 9에서와 같이 입력전압이 0과 V_{max} 사이의 임의의 점에서 반전하여 감소 또는 증가할 경우, 변위경로는 $H_r(V)$ 와 $H_f(V)$ 로부터 이탈하게 된다. 일단 이탈된 변위경로는 $H_r(V)$ 와 $H_f(V)$ 를 경계로 한 불확정 영역내에 존재하게 되나, 단순히 입력전압에 의해서만 결정되지 않고 과거 변위경로에 의해 영향을 받게 된다. 과거 변위경로를 대표하는 변수는 입력전압의 크기가 반전된 점 R 과 입력전압의 증감방향 $\text{sign}(\dot{V})$ 으로 관측되며 이들 두변수를 고려할 경우 변위와 입력전압의 관계는 다음과 같은 형태로 가정될 수 있다.

$$D = H(V, R, \text{sign}(\dot{V})) = \begin{cases} H_f(V) + \Delta D(V, R) & \text{if } \text{sign}(\dot{V}) > 0 \\ H_r(V) + \Delta D(V, R) & \text{if } \text{sign}(\dot{V}) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

이때 $\Delta D(V, R)$ 은 이탈된 변위경로가 식(3)와 (4)의 기준 곡선으로부터 유리된 편차를 의미하며, 입력전압이 증가시 ($\text{sign}(\dot{V}) > 0$)에는 $H_f(V)$ 로부터 정의되며 반면 입력전압이 감소시 ($\text{sign}(\dot{V}) < 0$)에는 $H_r(V)$ 로부터 정의된다.

Table 2 Polynomial fitting coefficients of PZT actuators

X axis		
	$H_f(V)$	$H_r(V)$
	$\alpha_0: 1.8821945 \times 10^{-6}$	$\beta_0: 1.7751360 \times 10^{-6}$
	$\alpha_1: 4.8026639 \times 10^{-5}$	$\beta_1: 8.1594771 \times 10^{-5}$
	$\alpha_2: 3.4810884 \times 10^{-7}$	$\beta_2: -2.0569806 \times 10^{-7}$
	$\alpha_3: -2.4160818 \times 10^{-9}$	$\beta_3: -2.5613439 \times 10^{-10}$
Fitting error	0.58%	0.55%

Y axis		
	$H_f(V)$	$H_r(V)$
	$\alpha_0: 1.2904710 \times 10^{-6}$	$\beta_0: 1.2248670 \times 10^{-6}$
	$\alpha_1: 4.2519703 \times 10^{-5}$	$\beta_1: 8.1200047 \times 10^{-5}$
	$\alpha_2: 4.4305554 \times 10^{-7}$	$\beta_2: -1.6151128 \times 10^{-7}$
	$\alpha_3: -2.6797429 \times 10^{-9}$	$\beta_3: -5.5988908 \times 10^{-10}$
Fitting error	0.61%	0.66%

Z axis		
	$H_f(V)$	$H_r(V)$
	$\alpha_0: 0.8190740 \times 10^{-6}$	$\beta_0: 0.4724920 \times 10^{-6}$
	$\alpha_1: 4.5307890 \times 10^{-5}$	$\beta_1: 8.2315615 \times 10^{-5}$
	$\alpha_2: 4.0173776 \times 10^{-7}$	$\beta_2: -1.7815971 \times 10^{-7}$
	$\alpha_3: -2.6868032 \times 10^{-9}$	$\beta_3: -4.9849197 \times 10^{-10}$
Fitting Error	0.65%	0.62%

입력전압이 증가하는 경우 편차 $\Delta D(V, R)$ 의 변화는 입력전압에 대한 비선형성을 갖는다. 반전점 R 에서의 변위를 각각 V_R 과 D_R 이라 정의하면 반전점에서의 편차는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta D(V_R, R) = D_R - H_f(V_R) \text{ if } \text{sign}(\dot{V}) > 0 \quad (6)$$

이로부터 입력전압이 증가하면 편차는 비선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 한 예로 Fig. 10(a)는 임의점 R_1, R_2 에서 반전하여 증가하는 경로를, Fig. 10(b)는 이들 경로의 $H_f(V)$ 에 대한 편차경로를 보여준다. 이들 경로는 반전점에 따라 다른 경로를 갖고 있으며 입력전압이 증가하면 비선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 편차의 변화는 다음과 같은 다항식으로 근사화할 수 있다.

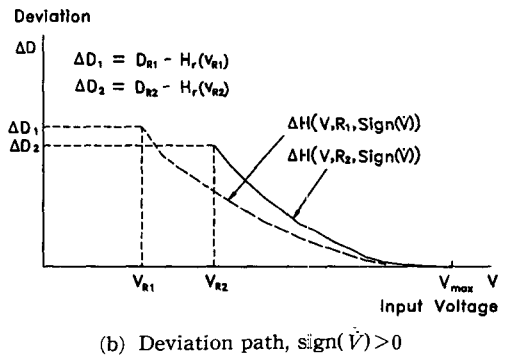
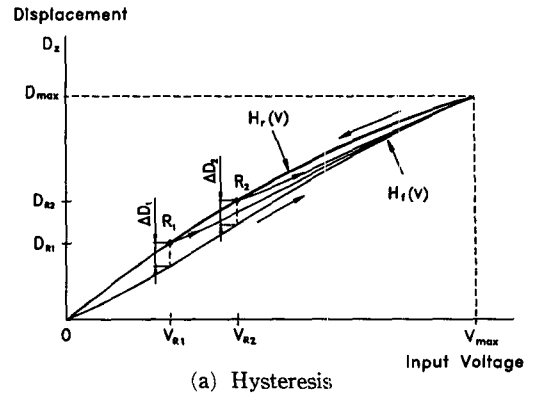


Fig. 10 Deviation from h_f when displacement paths reverse and increase at $R_1(V_{R1}, D_{R1}), R_2(V_{R2}, D_{R2})$

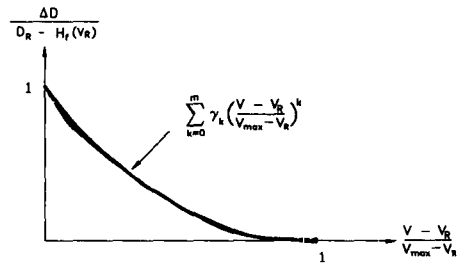


Fig. 11 Normalization of deviations from H_f

$$\frac{\Delta D(V, R)}{D_R - H_f(V_R)} = \sum_{k=0}^m \gamma_k \left(\frac{V - V_R}{V_{max} - V_R} \right)^k \text{ if } \text{sign}(\dot{V}) > 0 \quad (7)$$

Fig. 11은 Fig. 10(b)의 경로를 식(7)과 같이 나타내었을 때 근사적으로 같음을 알 수 있다. 또한, 입력전압이 감소하는 경우도 반전점에서의 편차는 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta D(V_R, R) = H_r(V_R) - D_R \text{ if } \text{sign}(\dot{V}) < 0 \quad (8)$$

입력전압이 감소하는 경우도 편차는 감소하는 경향을 보이며 식(7)과 유사하게 다음의 식으로 쓰여질 수 있다.

$$\frac{\Delta D(V, R)}{H_r(V_R) - D_R} = \sum_{k=0}^q \nu_k \left(\frac{V_R - V}{V_R} \right)^k \text{ if } \text{sign}(V) < 0 \quad (9)$$

식(7)과 (9)의 상수 r_k, ν_k 는 실험값으로 근사될

Table 3 Polynomial fitting coefficients of PZT actuators

X axis	
ΔD	
$\text{sign}(\dot{V}) > 0$	$\text{sign}(\dot{V}) < 0$
$\gamma_0: 0.9840274$	$\nu_0: 0.9598500$
$\gamma_1: -2.4014611$	$\nu_1: -2.1655838$
$\gamma_2: 2.1546738$	$\nu_2: 1.4568191$
$\gamma_3: -0.79588598$	$\nu_3: -0.3460397$
Fitting error	
7.1% for ΔD_{\max}	6.9% for ΔD_{\max}
Y axis	
ΔD	
$\text{sign}(\dot{V}) > 0$	$\text{sign}(\dot{V}) < 0$
$\gamma_0: 1.0016000$	$\nu_0: 1.0713863$
$\gamma_1: -2.5150850$	$\nu_1: -1.9494934$
$\gamma_2: 2.2757323$	$\nu_2: 1.1913840$
$\gamma_3: -0.7771080$	$\nu_3: -0.3098787$
Fitting error	
5.9% for ΔD_{\max}	6.1% for ΔD_{\max}
Z axis	
ΔD	
$\text{sign}(\dot{V}) > 0$	$\text{sign}(\dot{V}) < 0$
$\gamma_0: 1.0101061$	$\nu_0: 0.9521409$
$\gamma_1: -2.5941600$	$\nu_1: -1.8943356$
$\gamma_2: 2.4816141$	$\nu_2: 1.2053363$
$\gamma_3: -0.9079467$	$\nu_3: -0.2651927$
Fitting error	
6.4% for ΔD_{\max}	6.8% for ΔD_{\max}

수 있으며 이들의 결과와 근사오차가 Table 3에 수록되어 있다.

최종적으로 압전구동기의 입력전압과 변위와의 관계는 식(3)과 (4)의 기준곡선 다항식과 식(7)과 (9)의 편차에 대한 다항식을 식(5)에 대입함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$D(V, R, \text{sign}(\dot{V})) = \begin{cases} \sum_{k=0}^n \alpha_k V^k + (D_R - H_r(V_R)) \sum_{k=0}^m r_k \left(\frac{V - V_R}{V_{\max} - V_R} \right)^k & \text{if } \text{sign}(\dot{V}) > 0 \\ \sum_{k=0}^l \beta_k V^k + (H_r(V_R) - D_R) \sum_{k=0}^q \nu_k \left(\frac{V_R - V}{V_R} \right)^k & \text{if } \text{sign}(\dot{V}) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

주어진 입력전압에 대한 정밀한 변위를 식(10)을 사용하여 산출하기 위해서는 Fig. 12에 보인바와 같은 측정이 요구된다. 측정 데이터로 부터 상수 $\alpha_k, \beta_k, r_k, \nu_k$ 를 결정하게 되는데, 이 때 근사오차를 줄이기 위해서는 가급적 많은 다항식의 항을 사용하기 위해 k 의 값을 크게 하는 것이 좋으나 실질적으로 3으로 하는 것이 적절한 것으로 본 연구의 보정결과 확인되었다. 그리고 입력전압에 대한 방향의 변화를 기록하여 이로부터 반전점의 추출을 반드시 시행하여야 한다.

식(10)의 관계식에 대한 전체적인 타당성을 조사하기 위한 실험검증을 실시하였다. 방법은 연속적인 반전점을 갖는 Fig. 13(a)와 같은 입력전압의 경로를 설정하였다. 이 경로를 압전구동기에 입력한 후 이로부터 발생하는 실제 변위경로를 Fig. 7의 보정장치를 이용하여 측정한 후 이의 결과를 Fig. 13(b)에 도시하였다. 이 그림은 X축에 대한 실험결과이다. 식(10)의 관계식을 이용하여 경로를 계산하여 Fig. 13(b)와의 오차를 산출한 후 Fig. 13(c)에

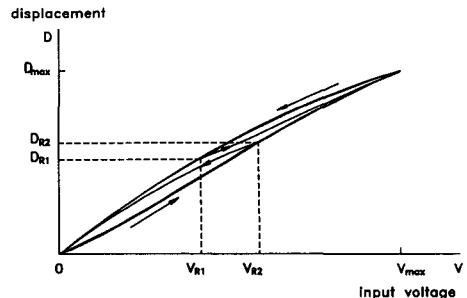
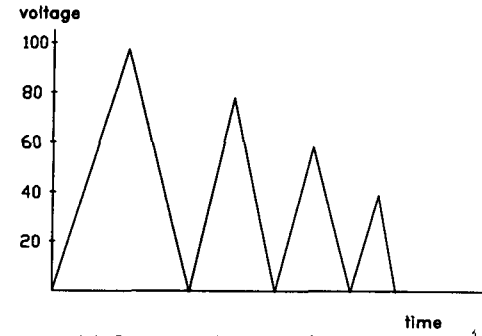
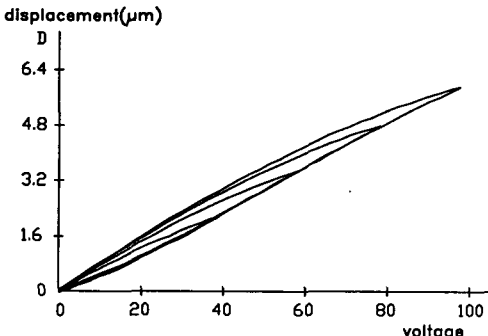


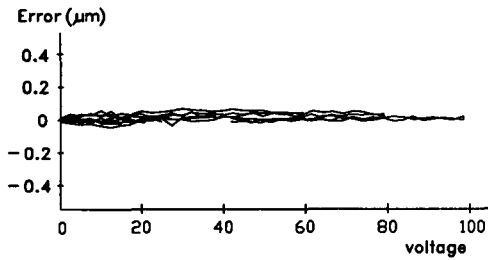
Fig. 12 Calibration measurement for parameter identification



(a) Input to piezoelectric actuator



(b) Actual path of piezoelectric actuator



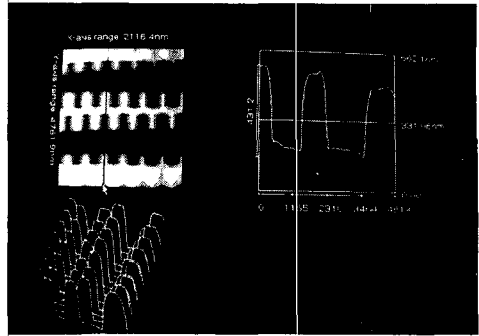
(c) Error of calibration

Fig. 13 Calibration result using non-linear polynomials

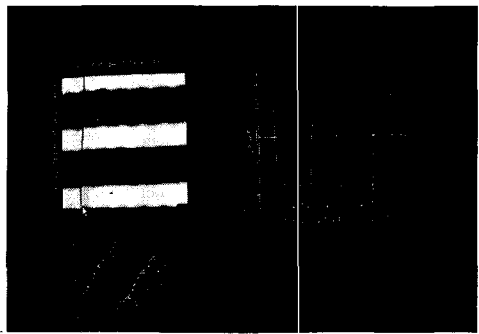
도시하였다. 측정결과 식(10)과 실험결과의 최대 오차는 1.67% ($0.968 \mu\text{m}/5.8 \mu\text{m}$)로 계산되었다. 따라서 관계식(10)의 오차의 1.67% ($0.968 \mu\text{m}/5.8 \mu\text{m}$)범위내에 실제 경로를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 실험 및 토의

Fig. 14은 터널링현미경 방법을 이용하여 반도체 표면의 $4 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 영역을 0.2 μm 형태로 주사하고, 이때 각 압전구동기의 입력전압을 근거로 식



(a) Uncalibrated surface profile



(b) Calibrated surface profile

Fig. 14 An example of measurement and nonlinear calibration using an ion-beam machined pattern

(2)의 선형 관계식과 식(10)의 비선형 관계식으로 부터 구동기의 변위량을 환산하여 도시한 한 예이다. Fig. 14(a)는 식(2)을 사용하여 계산된 결과이다. 그림의 좌측상단은 형상의 높이를 색의 명도로 나타낸 결과이며, 우측상단은 형상의 한 단면을 나타낸 그림이다. 또한 좌측하단의 그림은 형상을 3차원으로 도시한 그림이다. 이들 그림은 구동기의 비선형성에 의해 형상이 왜곡됨을 보여주고 있다. 이러한 형상왜곡은 Y축과 Z축의 비선형에 의해서 복합적으로 나타나고 있다. 한 위치에서 일정한 두께를 갖는 표면의 요철(凹凸)이 주사방향에 따라 다른 위치에서 다른 두께를 갖고 있는 것으로 나타나는 것은 주사축의 이력현상에 의해 나타난 왜곡이며 또한, 요철의 간격이 등간격으로 나타나지 않은 것은 주사축이 갖는 비선형성에 의해 나타나는 왜곡현상이다. 같은 높이의 요철이 위치에 따라 다른 높이를 갖는 요철처럼 나타나는 것은 Z축의 비선형이 보정된 결과이다. 그림의 좌측상단은 높이를 색의 명도로 나타낸 결과이며, 우측상단은 형상의 한 단면을 나타낸 그림이다. 또한 좌측하단의

그림은 형상을 3차원으로 도시한 그림이다. 이들 그림은 표면형상의 왜곡이 보상되어 표면요철의 간격이 일정하고, 균일한 높이를 갖는 형상을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 6(b)의 주사현미경사진과 유사한 형상을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 식 (10)의 비선형 변위결정식이 압전구동기의 비선형성에 의한 오차를 잘 보상하여 주고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 현재 원자의 형상을 측정하기 위해 사용되고 있는 주사형터널링현미경을 주사범위와 추적범위를 확대하여 반도체 패턴형상을 측정하기 위해 적용되었다. 한 예로 선폭이 $1\mu\text{m}$ 인 선폭을 갖는 형상이 측정되었다. 원자크기의 형상을 측정할 때와 마찬가지로 터널링 효과를 이용해 됨으로 선폭이 더욱 미세하게 되어도 nm의 분해능을 갖고 측정이 가능함을 보여 주었다. 또한 주사형터널링현미경의 구동기의 비선형성에서 기인되는 오차를 보상하기 위해 본 연구에서 제시된 보상알고리즘을 적용하였다. 제시된 보상알고리즘은 압전구동기의 상관관계를 단순히 입력전압에 따른 선형관계로 나타내지 않고, 입력전압과 입력전압의 크기가 반전된 점과 입력전압의 증감방향을 변수로 하여 나타내었다. 측정된 형상을 이 알고리즘으로 보정한 결과, 비선형성에서 기인되는 왜곡현상이 제거되었으며 이로인해 측정정밀도 또한 12.3% ($0.713\mu\text{m}/5.8\mu\text{m}$)에서 1.67% ($0.968\mu\text{m}/5.8\mu\text{m}$)로 향상될 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) 한국반도체연구조합, 1992, "12세기 선도기술 개발사업 (HAN Project)-초고집적 반도체 (256 MDRAM) 연구계획."
- (2) Young, R., Ward, J. and Scire, F., 1972, "The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopograph," Rev. Sci. Instr. Vol. 43, pp. 999~1011.
- (3) Wyann, J. C., Koliopoulos, C.L., Bhushan, B. and Basila, D., 1986, "Development of a Three-Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler," ASME-Journal of Tribology 108 pp. 1~8.
- (4) 赤坂洋一, 柏木正弘, 前田和夫, 吉見武夫, 1990, "超LSIプロセスデータハンドブック," Science Forum.
- (5) Binnig, G. and Rohrer, H., 1983, "Scanning Tunneling Microscopy," Sur. Sci. 126 pp. 236~244.
- (6) Hosaka, S., Hasegawa, T., Hosoki, S. and Takata, K., 1983, "Dynamic Observation of Si(111) Surface Using a Fast Scanning Tunneling Microscopy," Appl. Phys. Lett. 57(2), pp. 138~140.
- (7) 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.
- (8) Park, S.I. and Quate, C.F., 1986, "Tunneling Microscopy of Graphite in Air," Appl. Phys. Lett. 48, pp. 112~114.
- (9) Edstrom, R. D., Meinke, M. H., Yang, X., Yang, R. and Evans, D.F., 1990, "Scanning Tunneling Microscopy of The Enzymes of Muscle Glycogenolysis," Ultramicroscopy 33, pp. 99~106.
- (10) Brown, G.M., Allison, D.P., Warmack, R.J., Bruce Jacobson, K. and Carrier, W.L., 1991, "Electrochemically Induced Adsorption of Radio-Labeled DNA on Gold and HOPG Substrates for STM Investigations," Ultramicroscopy 38, pp. 253~264.
- (11) Stemmer, J. and Engel, A., 1990, "Imaging Biological Macromolecules by STM: Quantitative Interpretation of Topography," Ultramicroscopy 34, pp. 129~140.
- (12) Fowler, R.H. and Nordheim, L., 1928, "Electron Emission in Intense Electric Fields," Proc. Roy. Soc. Land, A119, p. 173
- (13) Simmons, J., 1963, "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film," J. Appl. Phys. 34, p. 1803
- (14) Yonezawa, H., Hirata, Y. and Sasaki, H., 1980, "Positioning Table with High Accuracy and High Speed," Annals of CIRP, 1980, 39(1), pp. 433~436.