

주사형 정전용량 현미경(SCaM)의 개발

김 응 규*

(*충남대학교 공과대학 시간강사)

1. 머리말

IC의 고집적화에 수반해서, 회로의 선폭은 더욱 더 미세화되어, 64Mbit 기억소자의 경우 0.25 μm 까지 미세화의 가능성이 예상되어져, 커팅과 검사공정에 있어 저렴한 가격으로 간단히 관찰가능한 현미경이 요구되고있다.

종래의현미경은, 렌즈계를 사용하기 때문에 빛의 파장에 의한 제약을 받아 광학현미경과 레이저 현미경의 경우 10분의 수 μm 이하의 분해능이 한계로 되어있다. 또한, 고분해능의 전자현미경의 경우 공기중이 아니면, 고에너지의 전자빔이 투과되지 않기때문에, 진공이외의 환경에서는 사용할 수 없다. Binnig 등에 의해 개발된 주사형 터널 현미경(Scanning Tunneling Microscope: STM)은 터널효과를 이용하기때문에 렌즈를 필요로하지않고, 물질의 원자 레벨까지 관찰가능한 분해능을 가지고 있어, 최근, 진공이외의 환경에서도 사용할 수 있게 되어 주목되고 있다.

Matey 등에 의한 주사형 정전 용량 현미경(Scanning Capacitance Microscope : SCaM)의 연구가 있지만, 그들은 VHD 비디오 디스크 시스템 회전주사 기구 및 회로를 거의 그대로 사용해서, 디스크판의 회전주사 표면상을 얻은것에 그치고 있다. 한편, Garbini 등은 일차원 방향 스캔용의 0.1 μm \times 2 μm 용량탐침을 사용해서 표면거칠기 검사를 위한 profilometer를 제작해서, 2.5mm의 구간을 5

μm 간격으로 시료 표면의 요철을 계측했으며, 그때에 용량탐침의 일차원 방향의 임펄스 응답을 해석해서, 그것에 근거한 보정을 하면, 기계식 profilometer에 가까운 특성이 얻어짐을 나타냈다.

본 연구에서 시험제작한 SCaM은 고체표면을 정전용량 탐침을 이용해서 기계적으로 평면주사함에 의해, 시료에 손상을 주지않고 표면의 형상을 정전용량의 변화로 포착해서 화상화하는 인식장치의 한 종류로서, 표면의 요철은 물론, 유전을 분포도 화상화 할 수 있다. 고체표면에 있어서 노출한 내부의 상태는 산란되어있어, 표면의 성질은 내부의 성질과 다르다고 사료되고 있다. IC등의 디바이스에서 도 표면의 성질이 그 기능에 영향을 준다고 사료되어, SCaM은 반도체와 금속의 표면구조의 연구등에도 응용될 수 있다고 사료된다. 또한, 시료에대해 빛과 전자에 의한 손상을 주지않기 때문에 세포등의 생물자료의 관찰에도 적합할 것이다.

이 SCaM을 타 현미경과 비교해서 그 특징을 열거해보면 다음과 같다.

1) 광학현미경과 레이저현미경보다 우수한 분해능을 가지고 있고, 이 둘과 조합해서 사용할 수 있다. 즉, 평상시는 광학현미경으로 관찰하면서, 더욱 더 세밀하게 보고싶은 부분이 있을때 SCaM으로 교체하는 등의, 조합해서 사용할 수 있다.

2) 전자현미경에 비해, 분해능은 뒤떨어지지만, SCaM은 공기중에서도 사용할 수 있다.

3) STM에 비해, 분해능은 뒤떨어지나, STM이

물체표면의 분자레벨의 특징을 포착함에 대해, SCaM은 더욱더 미세한 특징을 포착함에 적합하다.

위의 특징으로부터, SCaM은 광학현미경과 레이저현미경의 수비범위보다 미세하고, 전자현미경과 STM이 대상으로하는 영역보다 성긴영역으로, 특히 평면 대상물 표면의 관찰에 적합함을 알 수 있다.

본 연구에서는, 물체표면의 형상을 화상화하는 SCaM을 시험제작해서, 신호 검출방식으로서, 동기검파 방식을 사용했을때의 탐침 구동방식에 의한 시스템의 안정성에 대해 검토를 하였으며, 더욱이 검출기 출력이 일정하게되도록 feedback을 가했을때의 탐침의 높이를 시료표면의 높이로서 출력하는 2.5차원 주사방식에 의한 화상화에 대해 검토를 했다. 제2장에서는 물체표면의 요철과 정전용량 변화의 관계에 대해 설명하고, 미소 정전용량의 검출법과 SCaM에 사용하고 있는 검출부에 대해 설명한다. 제3장에서는 SCaM의 구성에 대해 그 개략을 서술한다. 제4장에서는 SCaM의 주사계 히스테리시스 및 검출기출력의 재현성에 대해 기술하며, 제5장에서는 미분용량법에 의한 시스템의 안정화 및 시료의 화상화에 대해 검토하며, 제6장에서는 본 연구의 성과와 금후의 문제점에 대해 기술한다.

2. 정전용량변화의 검출

SCaM의 검출부는 디스크 표면의 요철을 정전용량의 변화로서 포착해서 비디오표현을 읽어내는 VHD시스템을 기초로해서 구성하고 있다.

2.1 표면의 요철과 정전용량 변화

대략적인 근사로서 그림1과 같은 한장의 얇고 폭이 넓은 판상의 1차원 형상전극을 고려한다. 여기에서, 대상물 표면의 요철 파고치는 전극의 평균 높이보다 작고, 전극주위 매체의 유전율을 일정하다고 하면,

이 전극과 평면아스 전극간의 정전용량은 다음식으로 표시된다.

$$C_{tot} = \epsilon_0 \epsilon_w \left(\frac{4}{\pi} \right) \ln \left(\frac{H}{2h} \right) \quad (1)$$

여기에서, ϵ_0 는 진공중의 유전율, ϵ_w 는 주변매체의 비유전율이다. 지금, 검출전극의 높이가 h_{max} 에서

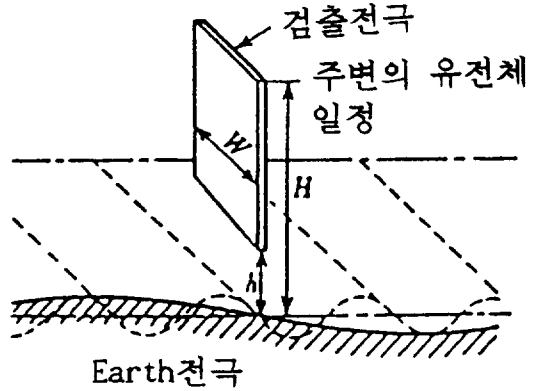


그림 1. 간략화한 전극구성

h_{min} 까지 변화했을 때의 정전용량 C_{tot} 의 변화량은

$$\Delta C = \epsilon_0 \epsilon_w \left(\frac{4}{\pi} \right) \ln \left(\frac{h_{max}}{h_{min}} \right) \quad (2)$$

로 표시된다. 또한, 높이의 미소한 변화 Δh 에 대한 용량변화 ΔC 는

$$\frac{\Delta C}{\Delta h} = -\epsilon_0 \epsilon_w \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{1}{h} \right) \quad (3)$$

로 표시된다. 한편, 용량검출 전극의 미소요철 분해능 A 는

$$A(h, \lambda) = \left(\frac{h_0}{h} \right) \exp(-2\pi \frac{h}{\lambda}) \quad (4)$$

로 표시된다. 여기서, h 는 검출전극의 임의 높이, h_0 는 평균높이, λ 는 대상물 표면의 요철변화의 공간파장이다. 이것에 의해,

$$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2\pi} \quad (5)$$

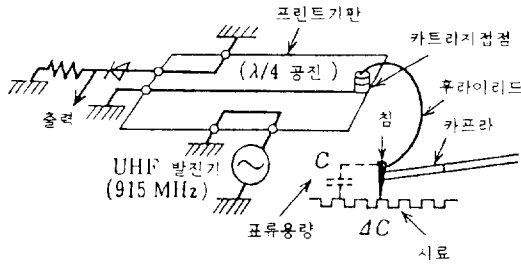
이면, 즉 침의 높이가 충분히낮으면 분해능을 공간파장에 의존함이 없이 거의 일정하게 된다. 그렇지만,

$$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2\pi} \quad (6)$$

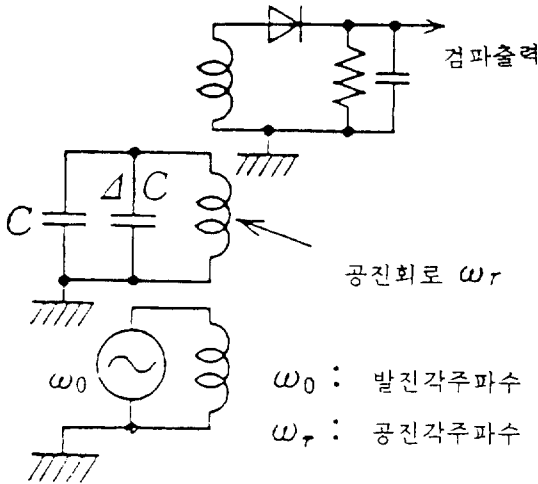
의 경우, 즉 검출 전극의 높이가 높은 경우, 분해능은 저하한다. 하지만 검출전극(탐침)의 두께를 무시할 수 없는 경우의 해석은 충분히 고려되고 있지 않다.

2.2 미소 정전용량의 검출

그림2에 나타낸 바와같이, 침의 표류용량 C 와



(a) 기본구성도



(b) 등가회로

그림 2. 미소 정전용량 검출법(VHD 방식)

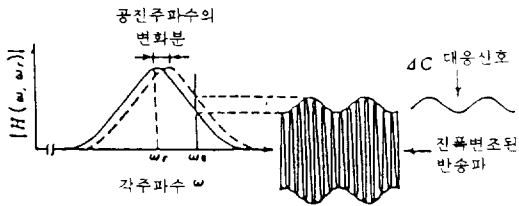


그림 3. 정전용량의 변화에 의한 검출기 출력

디스크면의 용량변화분 ΔC 와는, 프린트기판상의 프린트배선과 카트리지(cartridge)의 후라이리드(flylead)에서 공진회로를 형성한다.

외부로부터 공진주파수 ω_r 에 가까운 각 주파수 ω_0 를 갖는 반송파신호를 이 회로에 주입하면, ΔC 에 의해 ω_r 가 변화하기 때문에 ΔC 에 대응해서 반송파진폭변조를 받아, 이것에 의해 ΔC 대응시호가 검출된다(그림 3)

공진회로의 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

$$|H(\omega, \omega_r)| = \frac{k}{\sqrt{\omega_0 - \omega_r^2} + \alpha^2} \quad (7)$$

단, K 와 α 는 정수이다.

$\omega_0 - \omega_r = \pm \alpha$ 로, 3dB 이하의 공진특성에서는, $\Delta|H|/|H|$ 는 최대감도가 된다. 이 점을 동작점으로 선택하면, 진폭변조도 $\Delta|H|/|H|$ 는 다음식이 된다.

$$\frac{\Delta|H|}{|H|} = \frac{\omega_r \Delta C}{4(\omega_0 - \omega_r)C} = -\frac{Q}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (8)$$

탐침에 인가되는 반송파의 평균진폭의 피크-파크치를 V_0 로 하면, ΔC 에 의한 진폭변조분의 최대 피크-피크치는 $V_0(Q/2)(\Delta C/C)$ 가 된다.

3. 주사형정전용량현미경(SCaM)의 구성

SCaM의 실험장치

1) X-Y 주사와 탐침높이를 조정하기 위한 압전

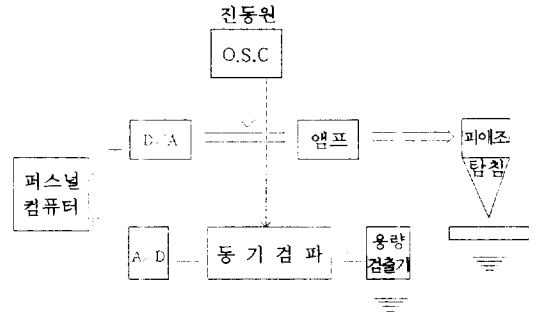


그림 4. 시스템 블록도

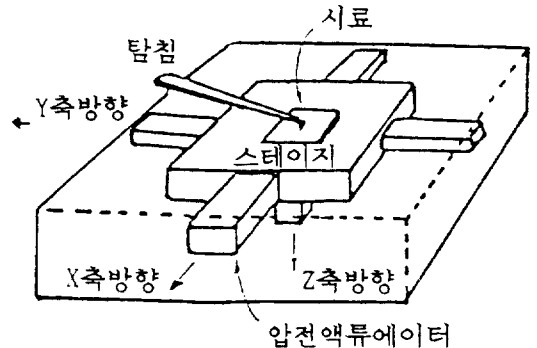


그림 5. 스테이지 구동방식의 스테이지 구동계

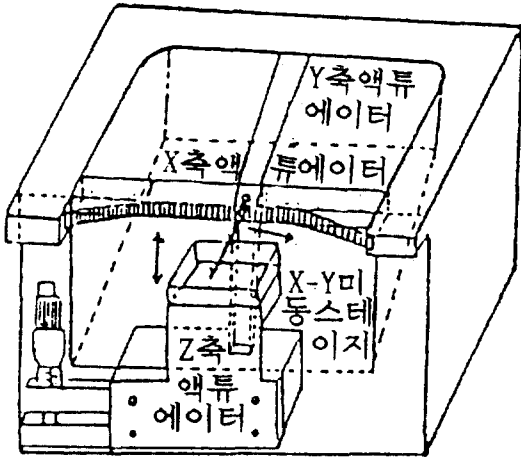


그림 6. 탐침 구동방식의 탐침 구동계

액츄에이터(piezo electric actuator)를 사용한 X-Y-Z미동장치

- 2) 정전용량의 변화를 포착하는 탐침
- 3) 정전용량의 변화를 진폭변조해서 용량변화 대응신호를 검출하는 픽업유닛(pick-up unit)
- 4) D/A 변환기와 발진기를 조합해서 압전액츄에이터를 구동하는 진동인가회로와 동기 검파회로로 구성되고, 또한 그 제어와 데이터 처리를 위한 퍼스날컴퓨터를 사용한다(그림 4).

탐침과 시료표면간의 거리를 진동에 의해 미소로 변화시키는 방법으로서, 탐침위치는 고정해서 시료 탐재대를 압전액츄에이터로 구동하는 스테이지 구동방식(그림 5)과 시료탐재대를 고정하고 압전액츄에이터로 탐침을 미소로 진동시키는 탐침 구동방식(그림 6)이 있으며, 본 연구에서는 후자의 방식을 택하기로 한다.

4. 주사계 히스테리시스 및 검출기출력의 재현성

그림 7에서 X, Y축을 고정해서, Z축만 변화시켜, 탐침을 시료표면에 하강접근 시켜거나, 또는 시료표면에 접근하는 높이의 전후로부터 거꾸로 끌어 올렸을 때의 검출기출력을 나타낸다. 여기에서 약간의 히스테리시스의 특성을 볼 수 있는데, 그 원인으로 액츄에이터, 구동장치의 구조, 검출기의 특성 등이 고려되고 있다.

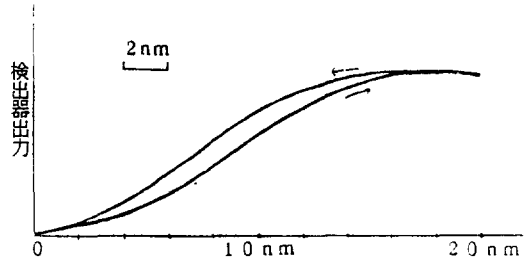


그림 7. 탐침 높이에 대한 검출기 출력

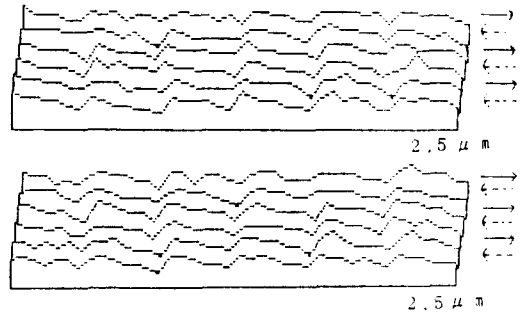


그림 8. 좌우방향 상호 반복주사시의 재현성

그림 8에는 탐침의 높이방향의 미조정회로에 의한 feedback의 안정성 및 횡방향 X축 주사계 히스테리시스의 영향을 보기위해 VHD디스크판에 대해 탐침을 하강시켜, Y축 고정상태로, X축의 +-방향으로 일차원 상호 반복주사시의 재현성을 나타냈다.

5. 미분용량법에 의한 시스템의 안정화 및 시료의 화상화

시료표면의 요철은 그림 1에 나타난 바와같이 표류용량 C(10-4pF)의 변화분 ΔC로 포착할 수 있으며, 그 때의 용량변화로서 용량 그 자체를 포착하는 직접법에서는 드리프트(drift)와 저주파 잡음의 영향을 크게 받기 쉽다. 그래서 탐침과 시료표면간의 거리를 진동에 의해 미소로 변화시켰을 때의 용량변화를 포착하는 탐침 구동방식의 미분용량법을 사용했다.

미소진동으로서, 당초 탐침의 고유진동(180Hz)에 가까운 160 Hz를 사용해서 포락선 검파방식에 의한 신호검출방식을 이용했지만, S/N을 고려할 때

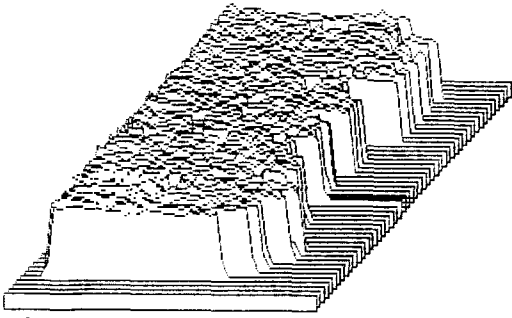


그림 9. 나이프(knife)의 날 선단부의 화상(사방 약 $5\mu\text{m}$)

주파수는 높은쪽이 바람직하기때문에, 10kHz를 사용한 동기 검파방식에 의한 신호검출을 행했다. 이때의 출력측 로우패스필터(low pass filter)의 차단 주파수는 10Hz이다. 탐침의 높이를 조절하는 Z축에는 소밀조종용 이외에 그것의 1000분의 1에 이르기 까지 미조종이 가능한 제어회로를 부착했으며, 계산 상으로는 $(5/1000)\text{nm}$ 단 위로 Z축(탐침 높이)을 제어할 수 있다. 탐침은 선단의 크기 약 $0.2[\mu\text{m}] \times 0.2[\mu\text{m}]$ 의 미연마 VHD탐침을 사용했다.

그림 9는, Z축에 미조종용 D/A변환기를 통한 feedback에 의한 2.5차원 주사화상을 나타낸다. 대상은 연필용 나이프(knife)의 날선단부이다. 주사 영역은 대략 사방 $5\mu\text{m}$ 이고, 49×49 점의 화소로 표현되고 있다. 이 확대율로 보면, 칼날선단부는 대단히 들쭉날쭉($1\mu\text{m}$ 정도)하고 있음을 알 수 있다. 즉, 주된주사는 히스테리시스의 영향을 보기위해 좌우방향으로 상호주사를 하였지만, 그 영향은 그다지 크지 않았다.

6. 맺음말

미소탐침을 STM과 같이 PZT등의 압전액튜에이터로 대상을 2차원 또는 2.5차원 주사해서 그 정전용량을 화상화하는 주사형 정전용량 현미경(SCaM)의 개발에 대해서 기술했다. 광학현미경과 레이저현미경은 빛을 이용하기때문에, 파장의 제약을 받아, 그 분해능의 한계는 $0.3[\mu\text{m}]$ 정도이다. 이것에 대해 SCaM은 광학방식과같은 분해능의 원리적 한계가 없고, 또한 광학상과는 다른 유전율상의 특성 화상이 얻어진다. 이와같은 특징에 의해, 최종적으로 $0.01[\mu\text{m}]$ 레벨의 분해능을 얻을 수 있는 실용레

벨의 현미경을 시험제작함을 목적으로 하고있다.

본 연구에서는 탐침과 시료표면간의 거리를 진동에 의해 미소로 변화시켰을 때의 정전용량의 변화를 포착하는 미분용량법을 이용했으며, 탐침높이 및 주사시에 있어서의 검출기 출력의 재현성, 즉 신호 검출방식으로서의 S/N이 양호한 동기검파를 이용했을 때의 탐침 구동방식에 의한 시스템의 안정화에 대해서 실험적 검토를 하였다. 이와같은 검파방식에 의해 잡음, 히스테리시스 등의 영향에 대해 개선이 되고, 분해능도 향상 되었다. 더욱이 2.5차원 탐침 주사방식 미분용량형 정전용량 현미경에 의해 칼날 부분 선단부의 확대화상이 명료하게 얻어졌다. 그러나 실용적으로는 아직 불충분하며, 이하의 문제점이 과제로서 남아있다.

- 1) 주사영역 결정시 광학현미경과의 대응관계를 충분히 확인할 수 없기 때문에, 주사시에 광학현미경으로 관찰가능한 시스템의 설계대책
- 2) 외부로부터의 잡음을 억제하기 위한 보다 안정한 시스템 환경조성
- 3) 압전액튜에이터의 히스테리시스 오차의 보정을 위한 부귀회로 등의 고안 및 궁극적으로, 그 저멸화, 특히 화상처리에 의한 저멸화의 검토
- 4) 표면에 유전체를 가진 집적회로 등의 표면용량 map의 작성방법의 고안 등이다.

참 고 문 헌

- [1] U. Durig, D. W. Pohl, and F. Rohrer: "Near-field optical-scanning microscopy", J. Appl. Phys., 59(10), pp. 3318-3327, 15 May 1986.
- [2] G. Binnig and H. Rohrer: "Scanning Tunneling Microscopy", IBM Journal of Research and Developments, 30, 4, 335, 1986.
- [3] 内野研二: "壓電/電歪의 アクチュエータ", 森北出版, 1986.
- [4] J.R.Matey and J.Blanc: "Scanning capacitance microscopy", J.Appl. Phys., 57, 5, 1 March 1985.
- [5] J.L.Garbini, L. J. Albrecht, J.E.Jorgensen, and G.F.Mauer: "Surface profilometry

based on fringing capacitance measurement”, J. of Dynamic System, Measurement and Control, Sept. 1985.

[6] J.K.Clemens: “Capacitance pick-up and burried subcarrier encoding system for the RCA videodisc” RCA Review, 39, 1.

[7] 渡部博志他: “走査型靜電容量顯微鏡 SCaM (1)”, 電氣關係學會 中國支部連合大會, 102321, p. 199. 1988.

[8] 官地臣一他: “走査型靜電容量顯微鏡 SCaM (2)”, 電氣關係學會 中國支部連合大會, 102322, p. 200. 1988.

[9] Mikio Takai: “Nuclear Microprobe Application in Semiconductor Process Developments”, Scanning Microscopy, Vol. 6, No. 1, pp. 147-156, 1992.

[10] Mikio Takai: “Formation of High Energy Microbeams and Their Application to Microelectronics”, Internationa Journal of PIXE. Vol. 2, No. 2, pp. 107-128, 1992.

[11] 金應珪他: “微分容量方式走査型顯微鏡とVHD針驅動系の再現性”, 電子情報通信學會 秋季全國大會, D-242, p. 6-244, 1990.

[12] 金應珪他: “ステーズ驅動および驅動微分容量方式走査型顯微鏡”, 電子情報通信學會春季全國大會, D-394, p. 7-106, 1991.



김응규(金應珪)

1952년 11월 1일생, 1976년 충남대 공대 공업교육과 졸업. 1976년 동대학원 공업교육과 졸업(석사). 1993년 대판대학 의학연구과 졸업(공박). 1989~1991년 대판대학 의학부 조수. 현재 충남대 공대 시간강사. 관심분야: 컴퓨터비전, 화상처리, 화상인식장치의 개발.