

論文94-31B-7-12

스테이지 구동방식 주사형정전용량 현미경

(Scanning Capacitance Microscope by Stage Driving)

金應珪*

(Eung-Kyeu Kim)

要約

본 연구에서는 스테이지 구동방식 주사형정전용량현미경(SCaM)이 사용되었으며, 몇몇의 실험 적결과를 제시했다. SCaM은 $0.2\mu\text{m}$ 의 정전용량탐침을 이용해서 물체표면을 기계적으로 2차원 또는 2.5차원 주사함에 의해 물체표면의 형상과 정전용량분포를 화상화하는 현미경이다. 이 SCaM 은광학현미경의 한계를 넘어서 공기중에서 $0.1\mu\text{m}$ 의 해상력을 목표로하며, X선에 의해 에칭된 ULSI패턴과 생물학적자료등을 검사하는데 유용한 장치이다. 실험시스템은 비디오 디스크면의 정전용량변화를 포착해서 비디오 신호를 읽어내는 VHD(Video High-density Disc)방식을 기초로 해서 구성했다.

Abstract

In this work, a scanning capacitance microscopy(SCaM) by stage driving is proposed and presented some of the experimental results. SCaM is a microscope which scans a surface of materials mechanically in two or two point five dimensions by a capacitance probe with a few tenth μm size tip, and display images of the surface shape or capacitive distribution. The present target of the SCaM is $0.1\mu\text{m}$ resolution power which exceeds that of optical microscope. This will become a powerful tool for inspecting ULSI pattern etched by X-ray, biological data, etc. The experimental system is composed based on a VHD video disk which captures the capacitance changes of the video disk surface and converts it into video signal.

1. 서론

현재, 비디오디스크와 CD에서는 레이저광에 의한 커팅 및 재생이 행해지고 있다. 그러나, 이 방식은 빛의 파장에 의한 제약을 받아 $0.3\mu\text{m}$ 이하의 기록분

해능을 얻는다는 것은 매우 어려운 일이다. 실제 미소한 구멍을 통하여 반사되어 나온 광의 근접장에서 대상을 기계식으로 주사해서, 그 像을 얻으려고 하는 연구^[1]도 있지만, 촬영한 상의 효율면에서 문제가 있다. 이것에 비해서 VHD등의 정전용량형 기록방식은 그러한 제약이 없는 특징을 갖는다. 따라서 이 정전용량형 기록 방식은 커팅을 무엇으로 행하느냐 하는 것과 센싱거리 등의 문제가 있지만, 적어도 원리적으로는 광방식보다도 훨씬 큰 기록밀도를 달성할 수 있을 것이다.

*正會員, 大田産業大學校 情報通信工學科
(Dept. of Information and Communication Eng.,
Taejon National Univ. of Technology)
接受日字: 1993年 6月 4日

또한, 반도체패턴의 에칭프로세스를 생각해 보면, 그 에칭과장보다 더욱 더 분해능이 좋은 센싱 수단이 필요하게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 주사형정전용량 현미경(SCaM: Scanning Capacitance Microscope)을 설계제작하게 되었으며, 이것은 예를들면, $0.1\mu\text{m} \times 0.1\mu\text{m}$ 크기의 정전용량탐침을 물 체표면상 $0.01\mu\text{m}$ 높이에서 $0.1\mu\text{m}$ 간격으로 기계식으로 주사한다. 이 기계식주사에는 STM (Scanning Tunneling Microscope) [2] 등에서 사용된 압전액츄에이터 (piezo electric actuator) [3] 방식을 사용 할 수 있다. 즉, 주사형정전용량 현미경의 구상자체는 Matey [4] 등도 발표하고 있지만, 그들은 VHD 디스크장치의 회전주사기구 및 회로등을 거의 그대로 사용해서, 디스크판의 회전주사표면상을 얻은것에 그치고 있다.

한편, Garbini 등 [5]은 $0.1\mu\text{m} \times 2\text{mm}$ 의 1차원방향 스캔용 미소용량탐침을 사용해서, 표면의 거칠음 정도의 검사를 위한 profilometer를 만들어 2.5mm 구간을 $5\mu\text{m}$ 간격으로 자료표면의 요철을 계측했으며, 그 때에 용량탐침의 1차원방향 임펄스응답을 해석해서, 그것에 기초한 보정을 행하면, 기계식 profilometer에 가까운 특성이 얻어지게됨을 보고했다.

본 연구에서 시험제작한 SCaM의 주사방법은 STM의 기본적인 원리를 이용하고있어 기존의 SCaM과 유사하다고 볼 수있으나, 그 제작목적은 광학현미경의 확대(zoom up)기능과 STM의 탐침 guide로써의 실용적인 관점에 두고있어 해상도를 결정하는 탐침의 크기(예로, 기존 SCaM의 경우 $0.01\mu\text{m} \times 0.01\mu\text{m}$ 이하) 및 탐침-시료표면간의 거리를 제어하는 구동장치(예로, 기존의 경우 0.01nm 이하의 거리조정이 가능하도록 압전액츄에이터의 Z축에 별도로 부착)의 구조가 다르다는 점이다. 용량탐침을 대상물 표면에 충분히 가깝게한 경우, 대상물과 용량탐침간의 면이 형성하는 정전용량만을 고려하면, 공기중에서 그것은 $C = \epsilon_0 S/d$ 로 주어진다. 위의 예에서 면적 $S = 10^{-14} [\text{m}^2]$, $d = 10^{-8} [\text{m}^2]$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{12} [\text{F/m}]$ 이어서, $C = 8.85 \times 10^{-18} [\text{F}] = 8.85 \times 10^{-6} [\text{PF}]$ 가 된다. 만약 대상표면 형상과 유전율의 변동에 의한 용량 C의 변동분 ΔC 가 검출가능하다고 하면, 그들을 화상화 할 수 있다.

이와 같은 방식에 의한 현미경은 데시미크론 크기의 해상도를 지닌 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 광학현미경과 레이저현미경보다 뛰어난 해상도를 가지며, 동시에 그들과 조합해서 사용 할 수 있다. 즉, 보통은 광학현미경으로 관찰을 하고, 더욱 더 미세하게 보고싶은 부분이 있다면 정전

용량방식으로 바꾸어 사용하는 것이 가능하다.

- (2) 전자현미경에 비해서 해상도는 떨어지지만, 공기중에서 사용할 수 있다.
- (3) STM에 비해 분해능은 뒤지지만, STM이 물체 표면의 분자레벨의 특징을 포착하려는 것에 비해, SCaM은 더욱 더 거시적인 특징을 포착하는데 적합하다.

이상의 사실에서, SCaM은 광학현미경과 레이저현미경의 측정범위보다 미세하고, 전자현미경과 STM이 대상으로 하는 측정영역보다 넓은 영역의, 특히 평면대상물 표면의 관찰에 적합하다고 할 수있다.

본 연구에서는, 물체표면의 형상을 화상화하는 SCaM을 시험제작해서 대상물 표면을 스테이지 구동방식으로 주사했을때 $0.2\mu\text{m}$ 의 해상도를 얻고있음을 실험적으로 보여주고 있다.

제 2장에서는 물체표면의 요철과 정전용량변화의 관계에 대해 설명하고, 미소정전용량검출법과 SCaM에 사용하고있는 검출부에관해서 설명한다.

제 3장에서는 SCaM의 구성장치에관해서 그 개략을 기술하고, 제 4장에서는 대상물표면의 시료로써 VHD디스크판을 사용했을때의 표면용량상과 농담표시화상 및 스테이지 구동시 표류용량의 변화인 아티팩트에대해서 나타낸다.

제 5장에서는 본 연구의 성과와 문제점 및 급후의 과제에대해서 기술한다.

II. 정전용량변화의 검출

그림 1과 같은 얇고 폭이 넓은 판상의 1차원형상의 용량탐침을 고려할 수 있다. 이 탐침의 측면과 평면 어스(earth)전극간의 정전용량은 다음식으로 표시된다.

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

여기에서, ϵ_0 는 진공중의 유전율, ϵ 은 주변매체의 비유전율이다. 지금, 용량탐침의 높이가 h_{max} 에서 h_{min} 까지 변화했을 때의 정전용량 C_{tot} 의 변화량은

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

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

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

로 표시된다. 한편, 용량탐침의 미소요철에 대한 공

간주파수 전달함수는

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

로 표시된다. [4] 여기서, h는 탐침의 평균높이, h₀는 임의 참조높이, λ는 대상물의 공간파장이다. 이것에 의해,

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

이며, 즉 탐침의 높이가 충분히 낮으면 전달함수는 공간파장에 의존함이 없이 거의 일정하게 된다. 그렇지만,

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

의 경우, 즉 탐침의 높이가 높은 경우, 고주파성분은 감쇄한다.

미소 정전용량검출법식 [6]을 그림 1에 나타낸다. 탐침의 표류용량 C와 디스크면의 용량변화분 ΔC와는, 프린트기판상의 프린트배선과 카트리지(cartridge)의 후라이드(flylead)에서 공진회로를 형성한다. 외부로부터 공진주파수 ω_r에 가까운 각 주파수 ω₀를 갖는 반송파신호를 이 회로에 주입하면, ΔC에 의해 ω₀가 변화하기 때문에 ΔC에 대응해서 반송파진폭변조를 받아, 이것에 의해 ΔC 대응신호가 검출된다. (그림 2)

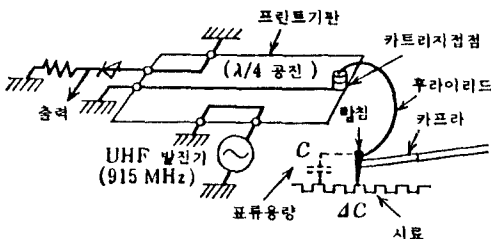
공진회로의 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

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

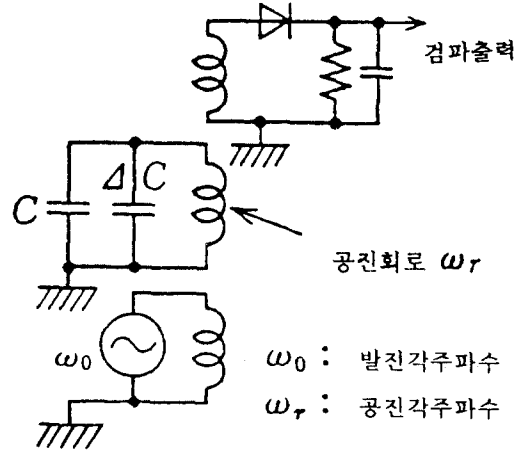
단, K와 α는 정수이다.

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

이 식으로부터 진폭변조도 Δ|H|/|H|는 다음 식이 된다.



(a)



(b)

그림 1. 미소 정전용량 검출법 (VHD 방식)

(a) 기본 구성도 (b) 등가회로

Fig. 1. The method of capacitance detection (VHD method).

(a) Schematic diagram

(b) Equivalent circuit.

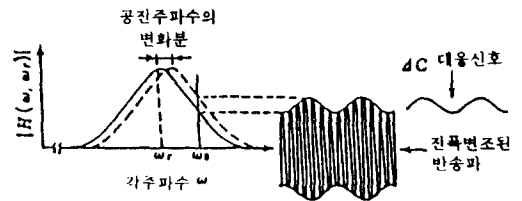


그림 2. 정전용량의 변화에 의한 검출기 출력

Fig. 2. Detector output by capacitance change.

Ⅲ. 주사형 정전용량현미경의 구성

1. SCaM의 실험장치

- X-Y 주사와 탐침높이를 조정하기 위한 압전 액츄에이터(piezo electric actuator)를 사용한 X-Y-Z 이동장치
 - 정전용량의 변화를 포착하는 탐침
 - 정전용량변화를 진폭변조해서 용량변화 대응신호를 검출하는 픽업유닛(pick-up unit)
- 로 구성되고 (그림 3), 또한 그 제어와 데이터처리를 위한 퍼스널컴퓨터를 사용한다. (그림 4.5)

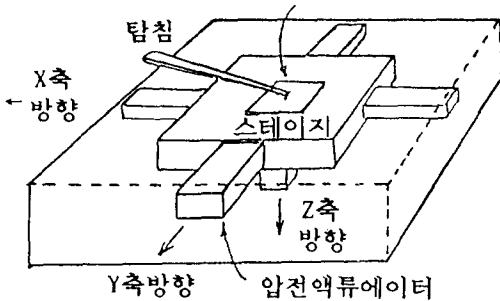
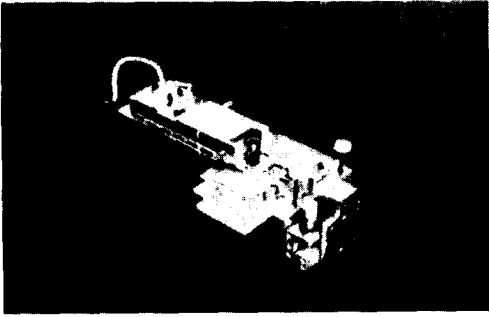


그림 3. X-Y-Z 미동 스테이지 및 검출기
Fig. 3. X-Y-Z stage driving and detector.

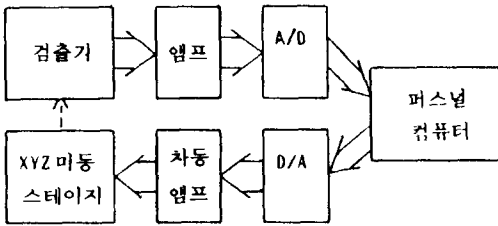


그림 4. 시스템 블록도
Fig. 4. System block diagram.

그림 5의 시스템 전경에 있어, 중앙의 조정용광학 현미경 스테이지(stage)위에 놓여진 것이 그림 3의 X-Y-Z 구동계 및 검출기이고 광학현미경 전체는 공기용수철 방진대에 놓여있다. 그 좌측이 구동계 드라이버(driver)회로, 우측이 파형관측용 오실로스코프(oscilloscope) 및 광학 현미경 스테이지 위치 엔코더(encoder) 출력표시기이다.

2. X-Y-Z 미동장치

기본적으로는 X-Y 주사로 화상을 얻고 있지만, 용량탐침의 높이 조정 및 2.5차원 주사에 의한 표면형상을 측정하기위해, X-Y-Z축을 함께 주사할 수 있는 미동 스테이지(X, Y축에 각각 동일압 전액튜에이터 소자정수 0.012 μm V 및 Z축용 압전액튜에이터 소자정수 0.065 μm V 사용)를 작성했다. 10mm \times 1mm 크기의 시료대를 X, Y축은 대향형, Z축은 상방향의 압전액튜에이터를 사용해서 구동한다. (그림 3)

일반적으로 시료표면을 용량탐침을 이용해서 기계식으로 주사하는 방법에는 스테이지를 구동하는 방법과 탐침을 구동하는 방법^{[7,8]}}이 있다. 본 연구에서는 설계의 용이함으로 부터 스테이지를 구동하는 방법을 채용했다. 결과적으로, 스테이지를 구동하는 방법에 있어서는,

- (1) 시료의 크기에 의해 기계정수가 변하고, 특히 openloop로 구동하는 경우 주사의 범위, 선형성 등이 변하게 될 가능성이 있고,
- (2) 대상물시료가 클 경우, 구동에 의한 시료와 주위환경과의 표류용량의 변화가 아티팩트 (artifact)로써 화상에 나타나는 점 등의 문제를 있음을 알게 되었다. 따라서, (1), (2)의 문제를 가능한 억제할 수 있는 방식으로써의 탐침 구동방식이 바람직하다고 할 수 있을 것이다.

IV. 실험결과

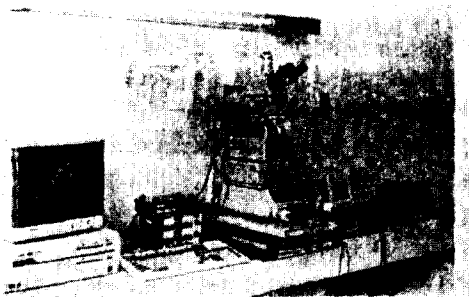


그림 5. 시스템 전경
Fig. 5. Picture of the system.

그림 4.5의 시스템을 선택해서 대상물표면의 검출과 화상화실험을 행했다. 용량탐침은 미연마 VHD탐침(전단의 크기 약 0.2 μm \times 0.2 μm)을 주로 사용했다. 비교를 위해 연마한 VHD탐침(전단의 크기 약 0.5 μm \times 0.2 μm)도 사용하고 있다. 본 실험의 경우, 용량탐침과 검파방식에 의한 수식적인 표현이 어렵기때문에, 광학현미경에 의한 시료의 이동량을 관찰함에 의해 목적상의 선단직경 0.2 μm 이하의 해상도를 얻었다. 표면대상물은 VHD 디스크판과 IC 등이다. 이때의 주사영역은 약10 μm \times 10 μm 으로써 이 사이가 100분의 주사선으로 구성되고, 각 주사선은 100개의 화소로

부터 이루어진다. 주사속도(시간)는 약 0.2 (초/주사선) 이다. 구동신호는 D/A변환기의 스텝상(step狀) 출력을 1차 뒤짐계(delay system)를 경유한 것을 이용했다. 현재에 있어서 구동계의 비선형성과 히스테리 시스의 보정은 행하고 있지 않다. 검출기/앰프의 주파수 대역은 20Hz~10KHz. 내지 50Hz~1.5kHz 이고, 또한 샘플링주파수(sampling frequency)는 0.6~1.0kHz를 사용했다.

얻어진 비디오 신호를 A/D변환해서, 조감도 표시한 것을 그림 6에 나타낸다. 또한, 농도(gray level) 표시한 것을 그림 7에 나타낸다. 각 최초의 주사선상의 영상신호는 정상상태에 달하고 있지 않기 때문에 과도적 신호이고, 그 외의 것과는 다르고 있다. 우측의 산맥형상은 디스크판면의 상처로서 생각되지만 확인할 수는 없었다. 좌측 돌기물은 디스크판의 비트(bit)로써 생각되지만, 앰프저역특성의 불충분, 탐침높이 조정의 불충분, 탐침의 앞끝부분의 불충분 등에 의한 것인지는 충분히 묘사되고 있지 않다. 재현성을 나타내기 위해, 그림 8에는 동일장소를 동일조건으로 촬영 한 화상을 나타낸 것이다.

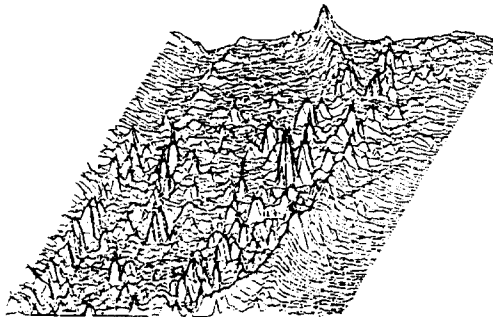


그림 6. VHD 디스크판 표면용량상
Fig. 6. Surface capacitance image of VHD disk plate.



그림 7. 그림 6의 농담표시
Fig. 7. Gray level of fig. 6.



그림 8. 그림 7의 재현성
Fig. 8. Reproduction of fig. 7.



그림 9. IC표면상 (2매는 동일장소)
Fig. 9. IC surface images of the same position.

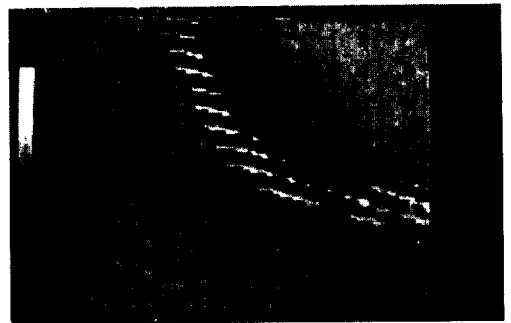


그림 10. 탐침의 접촉에 의한 것으로 생각되는 화상
Fig. 10. Image by contacting stylus on sample.

그림 9에는 IC표면의 동일장소를 촬영한 2매의 화상을 나타낸다. IC, 디스크판을 촬영한 것 중에는, 시료의 기울기와 표면회로 패턴에 의한 요철로인해 탐침이 부딪쳐서 생성되었다고 생각되는 화상(그림 10)도 있다. 더우기, 용량탐침에 의한 방법은 초점거리가 멀 경우라도 있기 때문에, 대상물과 필요분해능에 의한 탐침의 선택 또는 Z축의 제어가 필요하게 된다. 현재의 시점에서, 마이크로미터만의 수동에 의한 Z축 조정은 10 μ m 정도이다. 또한 그림 11에는 시료 스테

이지에 일정한 크기를 갖는 금속입체구조물 (각변이 수mm의 입체물)을 놓았을 때, 그것에 의한 스테이지주사시의 표류용량변화, 즉 아티팩트(artifact)를 나타낸다. 그림 11은 용량탐침을 대상으로 부터 충분한 거리를 두고 촬영한 것이다.



그림 11. 스테이지 구동방식의 아티팩트

Fig. 11. Artifact of driving methods of stage.

V. 결 론

본 연구에서는, 대상물체의 표면을 정전용량탐침을 사용해서 X-Y주사함에의해, 탐침과 시료표면 간에 생기는 정전용량의 미소변화 그 자체를 포착하는 직접법을 이용해서 공간해상력이 높은 정전 용량검출법에 의해 물체표면의 형상과 용량분포를 화상화하는 SCaM을 시험제작했다. 주사계로써, 탐침을 고정해서 압전액츄에이터로 구동시키는 X-Y미동 스테이지 방식을 사용했다. 그리고 SCaM을 사용해 VHD디스크판의 시료표면을 주사해서 그 표면용량상을 얻었으며, 또한 백록 농담처리하여 직접촬영한 화상과도 비교를 행했다. 그외 IC표면 화상과 주사시 탐침이 시료표면에 접촉되어 생겼다고 사료되는 화상 및 미동 스테이지 구동시의 표류용량변화에 의한 아티팩트를 나타냈다. 실험에 있어서는, VHD탐침(주로 미연마용 $0.2\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$ 사용, 비교를 위해 간혹, 연마용 $0.5\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$ 도 사용했으나 구별해 나타내지 않았음)을 표면주사에 사용했으며, 해상도로써, 탐침 그자체의 선단크기인 $0.2\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$ 이하를 얻고 있으나, 시험제작 목적으로써의 광학현미경의 확대(zoom up)기능과 STM의 탐침guide기능을 겸비한 현미경으로써, 특히 데시미크론 정도의 표면형상을 관찰 하는데 적합할 것으로 사료된다.

본 스테이지 구동방식의 특징으로, 광학방식보다 높은 공간해상력 및 고밀도 기록에의 응용가능성을 들 수 있으며, 단점으로는, 기계적인 주사 및 근접 주사가 있다. 이 주사방법은 초음파현미경과 동일한 방법이지만, SCaM은 공기중에서 주사할 수 있어, 시료 대상물에 따라서는 큰 방해가 되지 않을 것이다. 또한 표면요철 측정계에까지 응용면을 고려하면 현재의 접촉방식보다 유리하게 된다.

현재 남아있는 문제점과 과제로서는,

- (1) 탐침 선단부분의 형상제어
- (2) 화상의 정밀화와 광학상과의 대응관계
- (3) Z축 구동법의 검토
- (4) 압전 액츄에이터(piezo electric actuator)의 비선형성의 보정
- (5) 해상력의 향상 ($0.1\mu\text{m} \times 0.1\mu\text{m}$)
- (6) 고밀도 기록에의 응용

등을 들 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] U.Durig, D.W.Pohl and F.Roher : "Near-field optical-scanning microscopy", *J. Appl. Phys.*, 59 (10), pp. 3318-3327, 15 May 1986.
- [2] G.Binning 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 Systems, Measurement and Control*, Sept. 1985.
- [6] J.K.Clemens : "Capacitive pick up and the burried subcarrier encoding system for the RCA videodisc", *RCA Review*, 39, 1, pp.33~41, March 1978.
- [7] 渡部博志他 : "走査型静電容量顕微鏡 SCaM (1)", 電氣關係學會 中國支部連合大會, 1023 21, p.199, 1988.

- [8] 官地臣一他 : “走査型静電容量顯微鏡 SCaM (2)”, 電氣關係學會 中國支部連合大會, 1023 22, 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”, International Journal of PIXE, Vol. 2, No. 2, pp. 107-128, 1992.

 著者紹介



金應珪(正會員)

1952年 11月 1日生. 1976年 2月 충남대 공대 공업교육과(학사) 1978年 2月 충남대 대학원 공업교육과(석사). 1993年 9月 오오사카대학 의학연구과(박사). 1982年 ~ 1987年 충남대학교 공대 조교. 1990年 2月 ~ 1992年 3月 오오사카대학 의학부 助手. 1993年 3月 ~ 1994年 2月 충남대 공대 시간 강사. 1994年 3月 ~ 현재 대전산업대학교 정보 통신공학과 전임강사. 주관심 분야는 의공학용 화상처리 및 인식장치의 개발, 신경회로망, 컴퓨터비전등이며, 화상통신에 흥미를 갖고있음.