

GOVP 12000312

극미세 구조 기술 개발 사업
Nanostructure Technology Project

극미세 식각 및 석판 기술 개발
Fine lithography under $0.1 \mu m$

서울대학교
서울시립대학교
한국표준과학연구원

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “극미세 구조 기술 개발 사업에 관한 연구”과제 (세부과제 “극미세 식각 및 석판 기술 개발에 관한 연구”) 의 보고서로 제출합니다.

1999 . 9.

주관연구기관명	: 서울대학교
주관연구책임자	: 김 정 구
연 구 원	: 윤 석 원
공동연구기관명	: 서울시립대학교
공동연구책임자	: 박 선 우
공동연구기관명	: 한국표준연구원
공동연구책임자	: 엄 천 일

요 약 문

I. 제 목

극미세 식각 및 석판 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

오늘날 모든 소자의 소형화 추세에 따라 미세 소자 pattern 기술은 선결되어야 할 중요한 기술적 문제로 등장하고 있다. 예를 들어 1 giga DRAM 반도체의 경우 선폭이 $0.18 \mu m$ 이하이어야 하고 2007년 예상되는 16 giga DRAM 의 경우에는 선폭이 $0.1 \mu m$ 가 요구된다. 따라서 현재 KrF 및 ArF 등 광학적 lithography 의 한계를 뛰어 넘는 새로운 lithography 방법이 필요함을 알 수 있다. 또한 빠르게 발전하고 있는 nanoscience 및 nanotechnology 역시 atomic scale 의 미세구조를 조절 제작할 수 있는 조작 방법을 필요로 하고 있다. 선폭 $0.1 \mu m$ 가 가능한 방법으로는,

1) X-ray lithography, 2) scanning electron beam lithography, 3) phase shift를 이용한 lithography, 4) atomic force microscope (AFM) 등 scanning probe microscope를 이용한 lithography, 5) near field optics를 이용한 lithography 등이 예측되고 있다.

본 연구에서는 위에서 열거한 여러 가지 nano-lithography 방법 중 새로이 개발되기 시작하고 해상도가 가장 뛰어난 AFM lithography를 시도하여 극미세 식각의 새로운 방법을 개발하고자 하였다. AFM을 이용한 lithography의 경우에는 우선 준비되어야 할 장치가 간략하며 높은 공간적 분해능을 보장받을 수 있다는 잇점이 있다. 한편으로, AFM을 이용한 nanolithography를 하기 위해서 해결되어야 할 문제점은 선폭의 조절과 식각 속도 및 위치제어 기술의 개발이며, 요즘의 연구는 주로 이러한 문제점을 해결하는 데에 초점이 맞춰져 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 일 단계 연구로

- i) 먼저 인공적인 pattern을 그리기 위한 writing tool의 개발,

- ii) 제작된 소자의 작동특성과 진단을 위한 diagnostic tool의 개발과,
- iii) 미세 소자의 calibration 과 AFM의 positioning에 대한 연구를 시작하였다.

AFM의 개발과 lithography용 software의 개발 및 diagnostic tool용 DC-EFM의 개발은 제 1 세부과제(연구책임자 김 정구)에서, 소자 응용 및 FEA array를 이용한 동시 lithography는 제2 세부과제(연구책임자 박 선우) 그리고 nanolithography를 위한 정밀 위치제어 및 측정 시스템 개발은 제 3세부과제(연구책임자 엄 천일)에서 담당하였다.

IV. 연구개발결과

3차년도까지의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- i) AFM의 개발과 lithography용 software의 개발 및 diagnostic tool용 DC-EFM의 개발
 - a) noncontact mode MFM
 - b) 패턴 쓰기 방법으로서 AFM contact 모드와 tapping 모드의 개발
 - c) 진단 도구로서 Scanning Potentiometry
 - d) DC(Dynamic-contact) EFM의 개발
 - e) TGS 단결정과 PZT 박막위에서의 direct writing
 - f) SCM을 이용한 실리콘 특성 분석
 - g) piezoresistive cantilever를 이용한 DC EFM
- ii) 소자 응용 및 FEA array를 이용한 동시 lithography
 - a) SOG, PMPMA를 이용한 AFM lithography
 - b) ODMS, Terpolymer를 이용한 AFM lithography
 - c) FE-tips를 사용한 multi-tip lithography system 제작
 - SAL601 및 EBR-9 resist 물질에 대한 Line pattern을 획득
- iii) nanolithography를 위한 정밀 위치제어 및 측정 시스템 개발
 - a) 2축 미세이동대 설계제작
 - b) 정전 용량 센서 및 레이저 간섭계 제어 장치 제작
 - c) 엑스선 간섭계와 레이저 간섭계를 결합시킨 광/엑스선 복합간섭계의 개발
 - d) 나노리소그래피 시스템과의 통합화를 위한 연구
 - e) 구동 범위 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 에서 불확도 3 nm인 위치결정 기술을 개발

V. 연구개발결과의 활용

이상의 결과를 보면 이 극미세 식각 및 석판 기술 개발 과제에서는

- i) 다양한 lithography 기술의 개발,
- ii) 다양한 메모리 기능 소자 가능성의 제시,
- iii) 10 nm 급 lithography의 구현,
- iv) high throughput 기술의 개발,
- v) 정밀 위치제어 기술의 개발,

등 nanolithography에 대한 기본 기술 및 공정 기술 개발을 이룩하였다. 아울러 주요 개발된 기술은 외국 특허 신청을 하여, 개발된 기술의 수준을 짐작할 수 있다.

SUMMARY

I. Project Title

Fine Lithography under $0.1 \mu m$

II. Objective and significance of the Project

It has been recognized that pattern generation of fine structure in small devices should be urgent and immediate in the semiconductor industries because the main trend of fabrication lies in the smaller size. It is requested that the line width should be under $0.18 \mu m$ in 1G DRAM and under $0.1 \mu m$ in 16G DRAM which might appear in 2007. Therefore, a new type of pattern generation is required beyond conventional methods such as optical lithography using KrF and ArF. Also, the frontiers in science and technology go further into the nano-scale systems where we control atoms and utilize electronic properties of tiny elements. There are several methods by which we can fabricate the small structure under $0.1 \mu m$:

1) X-ray lithography, 2) scanning electron beam lithography, 3) lithography by phase shift, 4) lithography with scanning probe microscopes, 5) near-field optical lithography.

In this study, we have developed a new method of nano-fabrication using AFM(Atomic Force Microscope) which has very high spatial resolution. AFM assures that we employ simpler apparatus and make patterns with the precision of a few nanometers. On the other side, some technical problems related with line width, writing speed and precise positioning have been hot issues and concentrated on by AFM lithography developers in order to implement its functions.

III. Contents and Scope of the Research Activity

As the first step, we started with following studies:

- i) Development of writing tools in order to make artificial patterns.
- ii) Constructing tools to diagnose operating properties of devices.
- iii) Calibration of small devices and implementation of positioning.

The research has three subsidiary parts:

Development of AFM hardware, lithography software and dynamic-contact Electrostatic Force Microscope as a diagnostic tool is accomplished by Prof. Khim's group. (Project 1) Application of devices and multi-lithography with FEA array are left to Prof. Park (Project 2) while developing precise position system and calibrating tools are responsible for Dr. Eum. (Project 3)

IV. Results

Research activities during recent 3 years cover following areas:

- i) Development of AFM hardware, lithography software and dynamic-contact Electrostatic Force Microscope as a diagnostic tool
 - a) noncontact mode MFM(Magnetic Force Microscope)
 - b) employment of AFM contact mode and tapping mode as a writing method
 - c) Scanning Potentiometry as a diagnostic tool
 - d) Dynamic-Contact EFM(Electrostatic Force Microscope)
 - e) direct writing on TGS crystals and PZT film
 - f) Characterization of Si with SCM(Scanning Capacitance Microscope)
 - g) Dynamic-Contact EFM with piezo-resistive cantilever
- ii) Application of devices and multi-lithography with FEA array
 - a) AFM lithography on SOG and PMPMA - conventional photo-resist
 - b) AFM lithography on ODMS and Terpolymer - new photo-resist
 - c) multi-tip lithography system with FE-tips
- iii) Developing precise position system and calibrating tools
 - a) construction of 2-axis micro-transducer
 - b) fabrication of capacitive sensor and interferometer controller
 - c) development of combined interferometer using light and X-ray
 - d) study of integration of nano-lithography system
 - e) Precise positioning system with the precision of 3 nm

V. Suggestions for Applications

We present following accomplishments while completing the projects:

- i) Development of various types of lithography methods
- ii) Presentation of possibility of manufacturing memory devices with SPMs
- iii) Realization of 10 nm lithography
- iv) Implementation of through-put technique.
- v) Invention of precise positioning system

Some crucial inventions have been registered in the patent office abroad, and it shows our development technique has quite high standard.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction -----	10
Chapter 2. Current States of Domestic & Foreign Techonology -----	20
Chapter 3. Research Contents and Results -----	28
Section 1. Noncontact-mode and Magnetic Force Microscope -----	28
Section 2. Development of Tapping-mode and its Application to Fine Lithography -----	40
Section 3. Surface Potential measurement using Electrostatic Force Microscope -----	58
Section 4. Development of Dynamic Contact-mode Electrostatic Force Microscope -----	72
Section 5. Imaging and Writing on Ferroelectric Domain -----	87
Section 6. Surface Characterization using Scanning Capacitance Microscope -----	103
Section 7. Development of Electrostatic Force Microscope using Piezoresistive Cantilever -----	126
Section 8. AFM Lithography -----	134
Section 9. Field-Emission tips Lithography -----	169
Section 10. Precision Measurement of Translator -----	177
Section 11. Light/X-ray Composite Interferometer -----	203
Chapter 4. Research Achievements and Contributions -----	213
Chapter 5. Future Application -----	219
Chapter 6. Bibliography -----	220

목 차

제 1 장 서 론 -----	10
제 2 장 국내외 기술 개발 현황 -----	20
제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과 -----	28
제 1 절 비접촉 모드와 자기힘 현미경 -----	28
제 2 절 두드리기 모드의 개발과 미세 식각에의 응용-----	40
제 3 절 전기힘현미경을 이용한 전위측정법 -----	58
제 4 절 동적 접촉식 전기힘현미경의 개발 -----	72
제 5 절 강유전체 구역 관찰 및 구역 쓰기 -----	87
제 6 절 전기용량현미경을 이용한 표면 특성 연구-----	103
제 7 절 압저항(Piezoresistive)외팔보를 이용한 전기힘 현미경의 개발 -	126
제 8 절 AFM Lithography -----	134
제 9 절 FE-tips(Field Emission-tips) Lithography -----	169
제 10 절 이동대의 운동 정확도 측정 -----	177
제 11 절 광/X-선 복합간섭계 개발 -----	203
제 4 장 연구 개발 목표 달성도 및 대외 기여도 -----	213
제 5 장. 연구개발결과의 활용계획 -----	219
제 6 장 참고문헌 -----	220

제 1 장 서 론

오늘날 모든 소자의 소형화 추세에 따라 미세소자 pattern 기술은 선결되어야 할 중요한 기술적 문제로 등장하고 있다. 예를 들어 1 giga DRAM 반도체의 경우 선폭이 $0.18 \mu m$ 이어야 하고 2007년 예상되는 16 giga DRAM 의 경우에는 선폭이 $0.1 \mu m$ 가 요구된다. 따라서 현재 KrF 및 ArF 등 광학적 lithography 의 한계를 뛰어넘는 새로운 lithography 방법이 필요함을 알 수 있다. 또한 빠르게 발전하고 있는 nanoscience 및 nanotechnology 역시 atomic scale 의 미세구조를 조절 제작할 수 있는 조작방법을 필요로 하고 있다. 선폭 0.1 micrometer 가 가능한 방법으로는,

1) X-ray lithography, 2) scanning electron beam lithography, 3) phase shift를 이용한 lithography, 4) atomic force microscope (AFM) 등 scanning probe microscope를 이용한 lithography, 5) near field optics를 이용한 lithography 등이 예측되고 있다.

X-ray lithography는 X-ray 흡수가 많은 mask의 제작과 X-ray 강도가 높은 광원으로 synchrotron source등 이동성이 없는 기기에 의존하여야 한다는 단점이 있다. Projection 형태의 electron beam lithography는 space charge 때문에 electron current density를 낮추어야 하기 때문에 throughput이 낮을 수 밖에 없는 한계점이 있다. Scanning 형태의 lithography는 선폭의 미세화는 가능하나 resist의 개발, 선폭의 불균일성 및 writing 속도가 느려 낮은 throughput 문제가 해결되어야 한다.

본 연구에서는 위에서 열거한 여러 가지 nanolithography 방법 중 새로이 개발되기 시작하고 해상도가 가장 뛰어난 AFM lithography를 시도하여 극미세 식각의 새로운 방법을 개발하고자 하였다. 일 단계에서는 writing 속도보다는 writing tool의 개발에 초점을 맞추었다. 그러면 우리가 미세소자를 제작한다면 필요한 선폭은 얼마일까를 알아보기 위하여 본 연구진이 self-assembled 단결정 표면에서 관측한 I-V 특성 곡선을 보기로 하자. 그림 1-1-1의 I-V 특성이 step이 있는 것처럼 보이는 이유는 미세한 금속성 droplet 사이에 단일 전자가 관통할 때 charging energy가 $E_c=e^2/2C$ 가 되며 미세구조사이의 축전량 C가 아주 작으면 charging energy E_c 가 무시 못할 정도가 되어 전류가 억제되는 Coulomb blockade 효과가 나타난다. 예를 들어 Coulomb blockade의 step이 30 mV가 된다면, 이 때 droplet 사이의 capacitance는 5 aF 정도로 예상된다. 이러한 조건을 만족시키는 소자의 선폭은 10-100 nm의 해상도가 필요하다.

이처럼 고 해상도의 pattern 제작을 위해서는 AFM을 이용한 lithography 방법이 가장 적합하다고 판단하였다. Nanolithography를 하기 위해서 해결되어야 할 문제점은 선폭의 조절과 식각 속도 및 위치제어 기술의 개발이다.

따라서 본 연구에서는 일 단계 연구로

- 1) 먼저 인공적인 pattern을 그리기 위한 writing tool의 개발,

- 2) 제작된 소자의 작동특성과 진단을 위한 diagnostic tool의 개발과,
- 3) 미세 소자의 calibration 과 AFM의 positioning에 대한 연구를 시작하였다.

AFM의 개발과 lithography용 software의 개발 및 diagnostic tool용 DC-EFM의 개발은 제 1 세부과제(연구책임자 김 정구)에서, 소자 응용 및 FEA array를 이용한 lithography는 제 2 세부과제(연구책임자 박 선우) 그리고 nanolithography를 위한 정밀 위치제어 및 측정 시스템 개발은 제 3 세부과제(연구책임자 엄 천일)에서 담당하였다.

소자가 집적화 됨에 따라 패턴의 크기가 빛의 파장보다 작아지게 되어 이전의 사진공정에 의한 소자의 제작이 불가능하게 되었다. 따라서 새로운 패턴 제작 기술이 필요하게 되었는데 그 중 주목받고 있는 방법이 전자빔 식각 기술(Electron beam lithography)과 탐침 식각 기술(Scanning Probe Lithography) 이다.

전자빔 식각 기술은 빛 대신 수 십 keV 로 가속된 전자를 이용하는 것이다. 가속전압에 의해서 전자의 물질 파의 파장을 임의로 줄일 수 있으므로 빛을 이용한 경우와 달리 파장에 의한 제약이 없다. 전자빔 식각 기술에서 쓰는 Resist는 전자를 받으면 성질이 변하는 Ebeam 용 resist를 쓴다. 이 방법은 약 10 nm 정도의 구조까지 만들 수 있지만 미세한 전자빔을 scan 하면서 패턴을 제작하기 때문에 photo mask를 이용해 한번에 감광시키는 빛에 의한 사진 공정보다 속도가 훨씬 느리다. 그래서 대량 생산용으로는 적당치 않다.

탐침 식각 기술은 날카로운 탐침을 scan 해 가면서 패턴을 제작한다. 이 경우는 파장의 제한이 없고 단지 탐침 끝의 지름이 패턴 폭의 한계를 결정한다. 보통의 경우 탐침의 지름이 10 nm 정도이므로 10 nm 선 폭의 구조를 만들 수 있다. 전자빔 식각 기술처럼 진공장비 등의 거대한 장비가 필요 없고 단지 탐침을 scan 해 가면서 시료의 표면을 관찰하는데 쓰이는 탐침 현미경(Scanning Probe Microscope)을 약간만 변형하면 되는 편리함이 있다. 그러나 역시 scan 방식으로 패턴을 제작하기 때문에 속도가 느리다는 단점이 있다. 그러나 최근에는 여러 개의 탐침을 정렬 시켜서 한번 scan 으로 많은 패턴을 제작하는 방법이 도입되어 탐침 식각 기술에 의한 패턴 제작 속도가 많이 증가되었다[Minne 1998]. 따라서 탐침 식각 기술이 최근에 주목받고 있으며 다양한 분야로의 적용 가능성이 모색되고 있다.

탐침 현미경(SPM)은 z 방향의 분해능이 0.1 nm 정도로 매우 좋기 때문에 Ebeam Resist의 감광된 부분과 그렇지 않은 부분의 미세한 높이 차이를 구별해 낼 수 있다 [Takao Shiokawa 1998]. 보통의 전자빔을 이용한 Resist 감광의 경우에는 감광이 원하는 대로되었는지를 감광의 과정중에 알 수 없기 때문에 나중에 식각 과정까지 모두 끝낸 후에야 파악할 수 있다.

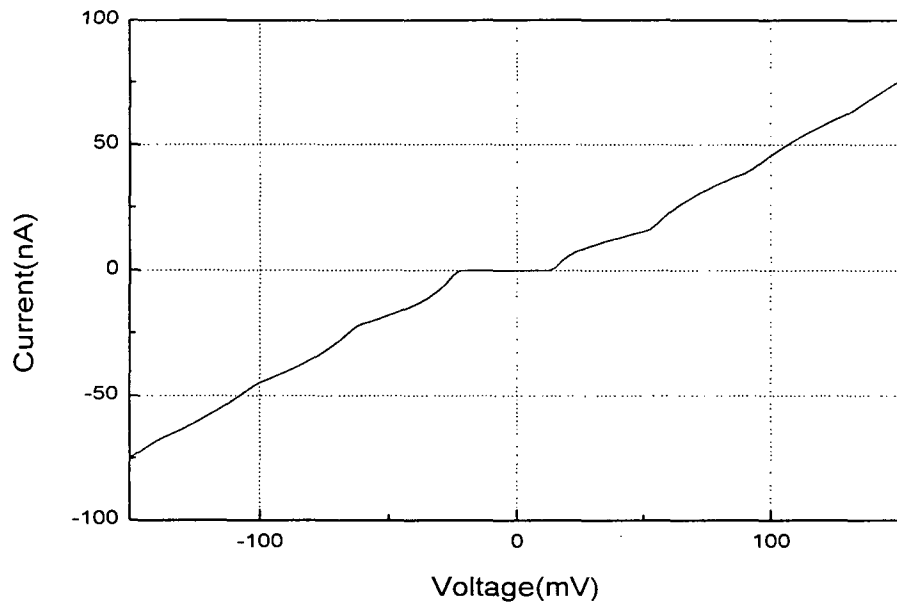


그림 1-1-1. SET junction의 I-V 특성

이에 비해 SPM을 이용하여 그림 1-2-1 과 같이 Ebeam Resist를 감광시킬 경우에는 감광하면서 바로 알 수 있기 때문에 패턴이 제대로 되지 않은 부분에 가서 그 부분을 다시 감광시킬 수도 있다. (그림 1-2-2 참조) 따라서 소자제작의 오차를 훨씬 더 줄일 수 있다.

위의 방법들로 제작된 에 의해 제작된 미세 패턴은 그 크기가 빛의 파장보다 작기 때문에 일반적인 광학현미경으로는 분석이 불가능하다. SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 대략적인 모양을 파악할 수는 있지만 소자의 패턴 크기가 수십 nm 정도로 작아짐에 따라 소자가 제대로 만들어진 것인지 정확히 판단하기 어렵게 된다. 또 SEM 등을 통한 패턴의 모양만을 파악해서는 실제로 소자 내부에서 전기적 신호가 원하는 대로 잘 전달되고 있는지 판별할 수가 없다. SEM을 통해 연결되어 있는 듯이 보이는 선들이 실은 전기적으로는 끊어져 있을 수도 있다.

따라서 미세 식각 기술이 발달하여 소자들이 집적화 됨에 따라 수 nm 정도를 잘 식별할 수 있고 또 그것의 전기적 신호 특성까지도 분석해 낼 수 있는 장비가 필요하게 된다.

이러한 장비로 주목받는 것이 탐침 현미경을 이용한 Scanning Potentiometer 이다. Scanning Potentiometer는 시료의 국소적인 표면전위를 측정할 수 있도록 SPM을 개조한 장비로 시료 표면의 수 nm 정도 부위의 전위를 수십 mV 정도의 분해능으로 측정할 수 있다. 또 수십에서 수백 MHz 정도의 고주파 신호도 측정할 수 있기 때문에 제작된 소자의 전기적인 신호흐름을 직접 측정할 수 있는 도구가 된다[Hong 1997]. Scanning Potentiometer는 쉽게 말해서 수 nm 정도 크기의 probe를 갖는 오실로스코프이다. 미세한 소자의 각 부분을 돌아다니며 원하는 신호가 나오는지 테스트 할 수 있기 때문에 미세패턴 제작의 테스트용으로 매우 필요하다.

이상에서 열거했던 이유들로 인해 미세 패턴의 제작과 분석 그리고 치유까지 가능한 탐침 현미경(SPM)이 식각기술의 중요한 도구로서 인식되고 있다.

전자빔 식각 기술과 탐침 식각 기술은 사진공정과는 전혀 다른 방법이기 때문에 기록매체도 사진공정에서 쓰는 포토리지스트와는 다른 것이 필요하다.

전자빔 식각의 경우에는 쏘아주는 것이 빛이 아니라 전자이기 때문에 전자를 받았을 때 성질이 변하는 PMMA 나 SAL601 등의 Ebeam Resist를 사용한다.

탐침 식각 기술의 경우에도 아래의 그림과 같이 탐침 현미경의 탐침과 시료사이에 전류를 흘려주어 Ebeam Resist를 감광시킬 수 있고 대부분 이러한 방법으로 패턴을 제작한다. 이렇게 Ebeam Resist를 이용하는 경우에는 어떤 종류의 Resist를 사용하느냐에 따라 제작된 패턴의 특성이 많이 달라지므로 적절한 Resist의 개발에 많은 연구가 필요하다.

전자빔 식각의 경우는 Resist를 사용하는 것 이외의 다른 방법이 거의 없지만 탐침 현미경을 이용한 경우는 다양한 기록매체를 사용할 수 있다.

탐침 현미경중 시료와 탐침사이의 힘을 측정함을 통해 시료의 정보를 얻는 Scanning Force Microscope(SFM)는 시료와 탐침사이의 어떤 힘을 이용하느냐에 따라 다양한 패턴 제작법이 가능하다.

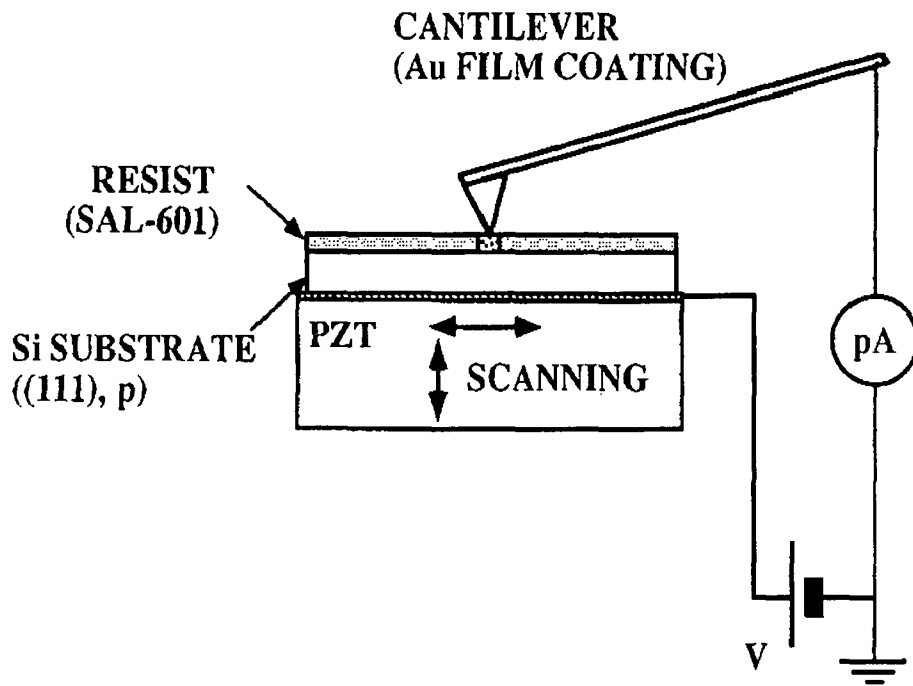
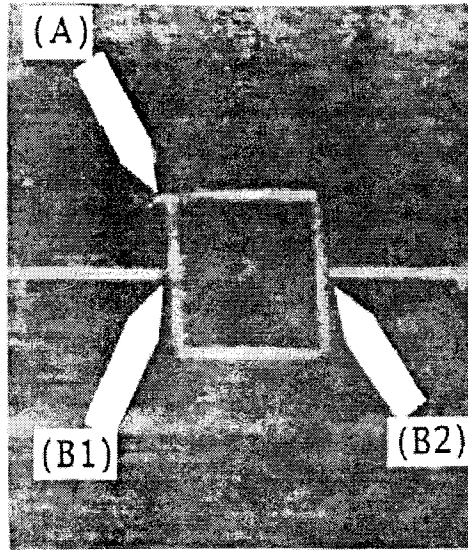


그림 2.2.1 탐침 현미경으로 전자를 주사하여 전자빔 용 리지스트를 감광하는 방법의 개략도



— 2 μm

그림 1.2.2a 탐침 현미경을 이용하여 리지스트를 감광한 후의 리지스트의 표면. B1, B2 부분이 끊어져 있다.

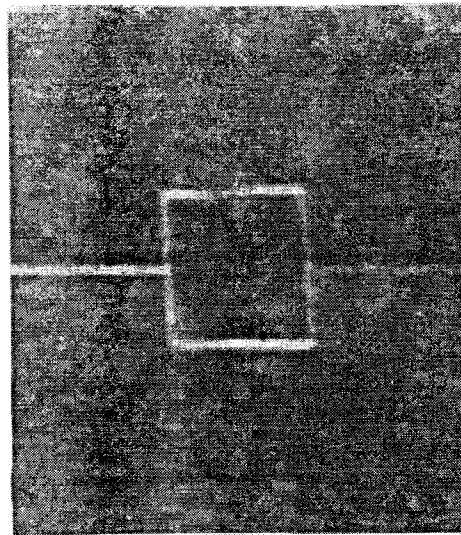


그림 1.2.2b 탐침으로 B1, B2 부분으로 다시 찾아가서 수정한 후의 리지스트의 표면

우선 단단한 탐침을 시료와 접촉시켜서 척력을 이용하여 시료 표면을 직접 긁거나 파낼 수 있다. 이러한 방법으로 시료위의 resist를 긁어내어 패터하거나 GaAs나 Al 등의 표면을 직접 파내는 방식으로 패터하는 것도 가능하다 [Pingue et al] [Sohn et al] [Bouchiat et al].

또 탐침과 시료의 정전기력을 이용해서 패터할 수도 있다. 강유전체 물질과 탐침사이에 전압을 가하면 강한 전기장에 의해 강유전체의 극성을 제어할 수 있다. 이러한 성질을 이용해서 강유전체 박막에 표면전하들로 미세한 패터를 만들 수 있다. 이렇게 패터된 표면전하들의 분포는 정전기력 현미경(Electrostatic Force Microscope)으로 나중에 다시 재현할 수 있다. 이렇게 강유전체의 극성을 제어하는 방법으로 패터를 하는 경우에는 시료의 표면의 모양에는 변함이 없다. 또 언제든지 전압을 가해서 극성을 다시 바꿀 수 있기 때문에 쓸 뿐만 아니라 지울 수도 있다. 이러한 장점으로 인해 강유전체를 High density data storage 나 memory device 로 이용하려는 시도가 최근에 많이 이루어지고 있다.[Scott et al]

시료와 탐침 사이에는 미량의 수분이 존재하는데 이러한 수분을 전해질로 이용하여 탐침과 시료사이에 전압을 가해서 시료에 산화피막이 생기게 하여 패터하는 방법도 많이 연구되고 있다. 방법이 간단하고 Si, GaAs, Ti, Al, Cr 등 많은 반도체, 금속등이 이러한 방법으로 패터될 수 있음이 알려져 있어서 많은 관심을 끌고 있지만 다소 불안정하다. 이러한 방법으로 상온에서 동작하는 Single Electron Transistor까지 제작되었으며 최근에는 이러한 패터방법을 안정화시킬수 있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

위에서 열거한 것처럼 탐침 현미경은 다양한 힘을 이용할 수 있기 때문에 가능한 기록 매체의 종류도 매우 다양하고 따라서 이에 대한 폭넓은 연구가 필요하다.

극미세 공정을 하다가 보면 그것을 평가하는데 현미경이 필수적이고 그 중에서도 탐침 훑기 현미경은 이제 많은 곳에서 흔히 쓰이는 도구가 되었다. 그러나 탐침 훑기 현미경은 그 역사가 그리 길지 못하여 아직도 연구단계에 있는 것이 대부분이고 많이들 상용화 되었지만 아직도 여러 방식들이 개발 중에 있거나 이해조차 제대로 되고 있지 않은 것들도 많이 있어 이를 체계적으로 이해하고 극미세 공정에 직접 이용하거나 공정 평가에 쓰일 수 있게 하는 일은 의미 있는 일이라 하겠다.

탐침 훑기 현미경을 나뉘는 방법에는 시료와 탐침 사이의 거리에 따른 구분과 탐침을 흔들어 주는지의 여부, 그리고 탐침의 종류에 따라 어떤 물성을 보는지 등에 따라 여러 가지로 나뉜다. 우선 시료와 탐침 사이의 거리에 따라서는 수십 nm정도로 떨어진 채로 훑는 비접촉식(noncontact-mode)과 수 nm에서 표면을 두드리며 훑는 두드리기식(tapping-mode)-혹은 중간 접촉식(intermittent-contact-mode)이라고도 한다-, 그리고 표면에 닿은 채로 훑는 접촉식(contact-mode)이 있다. 또한 탐침을 떨면서 보는 경우 동적(dynamic) 이라는 용어를 붙이는데 탐침을 떠는 방법에는 탐침이 있는 외팔보(cantilever)를 쌍뿔개(bimorph)로 흔드는 역학적인 방법과 전도성 탐침에 교류전위를 가하여 전기적인 힘으로 떨게 하는 전기역학적인 방법이 있다. 사실 대부분의 비접촉식 훑기 현미경은 동적이어서¹⁾ 따로 동적이라는 용어

1) 비접촉식이 모두 동적인 것은 아니다. 예를 들어 들어올리기식(lift-mode)의 경우에는 접촉식으로 한번 훑은 다음 그대로 들어 올려 같은 모양을 따라가며 그대로 훑는 것이기에 이 경우에는 비접

를 붙이지 않으나 접촉식인 경우에 특별히 전기역학적인 흔들림을 주는 방법을 쓰면 닿은 상태에서도 여전히 탐침의 진동이 남아 있게 되는 것을 우리가 발견하였고 이를 동적 접촉식 전기힘현미경(dynamic contact-mode electrostatic force microscope : DC-EFM)이라고 처음으로 명명하게 되었다[Hong 1999]. 또 다른 분류 방법으로 탐침의 종류에 따른 구분 방법으로 비전도성 탐침을 이용한 일반 원자힘 현미경, 탐침에 자성막을 입혀서 자기적 힘을 관찰하는 자기힘 현미경, 전도성 탐침을 이용해 전기적 성질을 볼 수 있는 전기힘 현미경²⁾ 등이 있다. 그밖에 같은 방식 내에서도 무엇을 보는지에 따라 구분 지을 수 있는데 예를 들어 같은 원자힘 현미경에서도 옆힘(lateral force)을 읽으면 옆힘 현미경(lateral force microscope) - 이를 마찰힘 현미경(frictional force microscope)이라고도 함 - 이라고 한다.

이러한 여러 모드들 중에서 극미세 식각과 관련해서 중요한 것들은 접촉식 원자힘 현미경, 두드리기식 원자힘 현미경, 동적 접촉식 전기힘 현미경 등이 있다.

먼저 접촉식 원자힘 현미경으로는 탐침에 직류 전압을 가하여 금속 박막이나 실리콘 층을 수십 nm의 정밀도로 산화시킬 수 있어 극미세 공정에 중요한 도구로 쓰일 수 있다. 그러나 접촉식이어서 훑는 동안 마찰력을 받게 되고 이것이 식각 선의 정밀도를 저해하는 단점이 있어 본 연구에서는 그러한 옆힘의 영향이 없는 두드리기 방식으로 극미세 식각을 하여 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

우리가 개발한 동적 접촉식 전기힘 현미경으로는 강유전체의 표면의 강유전 구역을 잘 관측할 수 있었을 뿐 아니라 수 V 내지 수십 V의 직류 전압으로 강유전 구역을 쉽게 뒤집을 수 있었다. 이는 동적 접촉식 전기힘 현미경이 FRAM 같은 메모리 소자에 쓰일 강유전체 박막의 특성을 나노 규모에서 잘 관측할 수 있는 도구가 될 수 있고 또한 강유전체 표면에서 나노 패턴닝도 할 수 있음을 보인 것이다.

식각 공정 자체 뿐 아니라 공정 후 평가에 있어서도 탐침 훑기 현미경은 탁월한 능력을 발휘한다. 이때 쓰이는 현미경 방식으로는 역시 두드리기식 원자힘 현미경과 두드리기식 전기힘 현미경, 두드리기식 자기힘 현미경, 그리고 동적 접촉식 전기힘 현미경 등이 있다. 이들 각각의 현미경은 각기 공정 후의 표면 굴곡이나 거칠기, 박막의 전도유무나 반도체 불순물의 도핑 정도, 자기박막의 특성 확인, 강유전체 표면의 특성 확인 등을 가능하게 하여 탐침 훑기 현미경으로 만든 극미세 공정뿐만 아니라 다른 공정을 통한 극미세 공정도 그 특성을 평가, 확인하는 데 극히 중요한 역할을 한다.

따라서 위에서 열거한 여러 방식의 탐침 훑기 현미경은 극미세 공정에서 꼭 필요한 장비들이고, 이러한 장비들의 개발과 새로운 방식의 측정 기술 개발, 그리고 각 방식에 대한 물리적인 이해 등은 보다 정밀하고 안정된 극미세 공정 개발의 선결 요건이기도 하다. 이에 본 연구진은 탐침 훑기 현미경을 극미세 공정 평가 뿐만

촉식이면서도 동적이지 않다.

2) 탐침에 걸리는 전압을 되먹임회로를 이용하여 표면 전위와 같게 만드는 경우는 특별히 scanning Kelvin probe microscope 혹은 scanning potentiometry microscope 라고 한다.

이 아니라 극미세 공정 자체를 탐침 훑기 현미경을 가지고 함으로써 극미세 공정에 대한 이해의 폭을 보다 넓힐 수 있었고 이를 통해 새로운 측정 기술도 개발할 수 있었다.

반도체 산업을 발전시키는 요인 중에서 특히, Lithography Technology는 여러 가지 기술 적인 면에서 어려움을 갖고 있으나, 그 중요성이 강조되고 있으며, 현재 반도체 생산업체에서 개발중인 Lithography Technology는 최소 선폭이 $0.05 \sim 0.10\mu\text{m}$ 이하인 pattern을 구현하는 데 그 목표를 두고 있다. 이는 G-bit DRAM 생산에 반드시 적용되어야 하는 기술이며, 따라서 이 목표를 충족시키기 위한 새로운 Lithography 기술 개발에 관한 연구가 활발히 진행중이다.

SPM(Scanning Probe Microscope)의 일종으로써 AFM과 STM은 현재 Nano 크기의 시료표면을 분석하는데 사용하는데 중요한 장비로 이용되고 있다. STM에 비하여 AFM은 비도전체 뿐 만 아니라 중합체, 생물체 같은 표면이 연성을 지닌 시료도 손상 없이 사용할 수 있는 장점을 지니고 있다.

이런 AFM을 이용한 연구는 단순한 시료의 표면을 연구뿐만 아니라 최근에는 그 응용범위가 확대되어 Nano-scale lithography 기술에도 이용되고 있다. AFM을 이용한 lithography 기술은 resist 물질을 이용한 방법, 수소로 passivation한 wafer위에 산화막을 형성시키는 Oxidation방법, 가스 분위기 하에 deposition하는 방법 등 다양한 방법으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 SPM(Scanning Probe Microscope)의 일종인 AFM(Atomic Force Microscope)의 원자 단위까지 이르는 고 분해능을 이용하여 nano-scale 범위의 lithography를 실행하고자 하였으며 이를 위해 AFM lithography에 적합한 resist 물질의 개발과 더불어 scanning probe가 갖는 low through-put rate를 개선하기 위해 Field Emission tips를 적용시킨 FE-tips lithography 장치의 개발에 대한 연구를 진행하였다.

나노미터 영역에서의 생산기술인 nanotechnology기술은 반도체 및 대용량 기록매체 분야에서 획기적인 성과가 이룩되고 있다. 반도체의 경우 리소공정이나 에칭공정 중에서 가공된 선의 선폭, 두께, overlay등을 측정하는데 집적도를 높이기 위해 선이 더욱 미세해지기 때문에 이들의 측정에 보다 높은 정밀정확도가 요구되고 있다. 마스크를 제작함에 있어서도 registration측정과 선폭측정을 하게 된다. 현재 이들의 대략적인 측정 요구수준은 $0.1 \mu\text{m}$ 수준이며 이를 위해서 주로 SEM(Scanning Electron Microscope)이나 광학적인 tool이 측정에 사용되고 있다. 그러나 이런 측정 tool에는 분해능의 한계가 있어 차세대 반도체 제작기술이 될 nano-lithography나 원자 분자 조작 기술 등이 실제 공정에 적용될 경우 기존의 측정 tool이 아닌 SPM(Scanning Probe Microscope)이 관측이 아닌 측정 tool로 사용될 것이다. 또한 chip의 크기가 커짐에 따라 overlay측정이 보다 중요해질 것이며, 마스크 제작에서도 registration 측정시 마이크로미터 수준이 아닌 나노미터 수준의 정밀정확도를 갖는 나노위치 측정/제어 기술이 필요하게 될 것이다.

1994년 미국에서 발표한 the National Technology Roadmap For Semiconductor에 의하면 2010년에 상용화될 것으로 보이는 64 Gbit DRAM 경우는 선폭 설계 지침이 0.07 μm 이 되어 현재의 광학식 lithography 방식 대신에 NX E-beam projection, NX Ion Projection, E-beam high throughput 혹은 1X Proximity X-ray 방식으로 대체 될 것으로 보인다. 전체적으로는 이러한 방식으로 패턴 형성을 하지만 국부적으로 SPM(Scanning Probe Microscope)등을 이용한 lithography 방식을 Mix & Match 형태로 사용할 것으로 보인다. 그리고 차세대 기억 소자로 현재 활발히 연구되고 있는 SET(Single Electron Transistor)등과 같은 양자 소자의 경우 10 nm 이하의 선폭 제작을 요구하고 있다. 그리고 이러한 극미세구조를 가진 소자의 선폭의 측정 정확도는 1 nm 이하로 되어야만 한다. 현재 sub- μm 영역에서의 선폭 측정 등은 전자 현미경으로 수행하고 있지만 선폭 공정 관리가 0.1 이하가 필요한 집적도를 가지는 웨이퍼에서의 선폭과 양자 소자에서의 형상 측정에서는 전자 현미경의 분해능도 한계를 가져 SPM을 이용한 선폭 측정이 주류를 이룰 것으로 예상된다. 이러한 극미세 소자의 선폭 제작과 측정을 위해서는 제작된 웨이퍼나 시료의 구동과 패턴의 위치 측정을 nm이하로 정확히 측정하는 기술이 필요하다. 그리고 이러한 위치의 정확한 제어와 측정을 위해서는 길이표준에의 소급성을 유지하면서 nm 이하의 고분해능을 가지는 레이저 간섭계와 높은 반복성을 가진 정전용량 센서(capacitance gauge) 및 angstrom 단위의 분해능으로 레이저 간섭계와 정전용량 센서를 교정할 수 있는 엑스선 간섭계를 이용해야 한다.

현재의 lithography 장비 등에서 이루어지고 있는 스테이지 제어 기술은 레이저 간섭계만을 이용하기 때문에 공기굴절률과 온도영향 등에 의해 많은 오차 요인이 있어 불확도가 수십 nm 정도가 되어 nano-lithography에 요구되는 정밀 스테이지의 요건에 맞지 않다. 이러한 오차요인을 줄이기 위해서 긴 거리는 레이저 간섭계로 제어하고 핵심적인 선폭 제작 및 측정이 이루어지는 범위에서의 측정은 정전용량 센서 및 엑스선 간섭계로 이루어져야 한다. 현재 SPM을 이용한 nano-lithography 연구가 선진국에서 이루어지고 있고 반도체 생산 공정에서의 측정을 위하여 AFM의 도입이 앞으로 확대될 것으로 보이기 때문에 이를 위하여 미국, 영국, 독일, 일본에서 기초적인 연구를 수행하고 있으며 반도체의 집적도가 높아지고 양자소자에 대한 수요가 다가옴에 따라 고부가가치 창출을 위한 소자 개발을 위하여 이러한 metrology system에 대한 기술을 선점하는 것이 경쟁력 강화에 필수적인 것이 될 것으로 예상된다.

본 연구개발의 최종목표는 nano-lithography를 위한 정밀 위치 제어 및 측정 시스템 개발이다. 주된 연구개발내용을 열거하자면 2축 미세이동대 설계제작, 정전 용량 센서 및 레이저 간섭계 제어 장치 제작, 엑스선 간섭계와 레이저 간섭계를 결합시킨 광/엑스선 복합간섭계의 개발, 나노리소그래피 시스템과의 통합화를 위한 연구 등을 들 수 있으며, 최종적으로 구동 범위 100 μm ×100 μm 에서 불확도 3 nm인 위치 결정 기술을 개발하였다.

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

반도체 소자의 고집적, 초소량화는 필연적으로 극미세 구조의 제작과 맞물려진다. 100 nm 미만의 식각(극미세 석판 기술) 기술의 발달은 고분해능의 마스크를 만들거나 미세 패턴의 직접 쓰기를 가능하게 한다. 널리 알려진 방법의 하나인 전자빔 식각 기술은 최근까지 근접 효과의 이해와 보정으로 분해능을 향상시켜 왔다. 근접 효과란, 감광층(photo-resist)에서 전면 산란된 전자들과 기판에서 후방 산란된 전자들에 의해서 감광층이 수 마이크론까지 노출되어 버리는 현상을 말한다. 만일 전자빔의 에너지를 낮추면 후방 산란된 전자들에 의한 근접 효과는 줄일 수 있으나, 낮은 에너지의 전자빔은 초점을 맞추기 힘든 결점이 있다. 그런데, STM(Scanning Tunneling Microscope)을 비롯한 주사형 탐침 현미경(Scanning Probe Microscope)의 발명은 탐침과 시료 사이에 전자를 낮은 에너지 상태로 국소화시킬 수 있는 잇점이 있어 1980년 중반 Stanford의 McCord와 Pease의 선구적 업적 이후부터 극미세 석판 기술에 적극 응용되었다. [McCord 1985]

STM은 보통 100 nm 미만의 매우 날카로운 탐침을 시료의 표면에서 수 Å이내의 영역에 위치시키게 되는데, 표면 높낮이를 영상화하는 보통 모드의 작은 꿰뚫기 전류(tunneling current) 정도로는 감광층의 화학적 조성을 바꿔 놓는데 충분하지 못하다. 그러나 전압을 좀 더 올려 감광층이 화학적 반응을 일으킬 정도의 꿰뚫기 전류가 흐르게 하면, 낮은 에너지 상태의 국소화된 전자들에 의해서 수십 나노미터 수준의 패턴을 만들 수 있다.

STM을 포함한 SPM 석판 기술의 연구 분야는 현재 감광층 물질을 이용하여 초미세 패턴을 형성시키는 방법, 가스 분위기에서 AFM(Atomic Force Microscope) 탐침의 전계에 의해 형성된 석출막으로 패턴을 형성시키는 방법, 수소로 비산화 처리된 Si 웨이퍼 또는, poly-Si 등의 표면 위에 AFM 탐침의 전계에 의한 산화막 형성 패턴을 얻는 방법 등 다양한 방법들이 진행되고 있다. [Matsumoto 1997, Majumdar 1992, Minne 1995a]

우선 STM을 이용한 석판 기술의 방법은, 전도성이 좋은 물질의 표면 위에 매우 얇은 절연층이 입혀져 있는 경우에만 가능하고 압전구동자(piezoelectric actuator)로 넓은 영역을 누비고 다닐 때에 탐침과 시료 간의 간격을 0.1 nm 이하의 오차로 일정하게 유지시키면서 적절한 속도를 내야 한다. 묘사 기술에 이용되고 있는 SPM 계열의 전자현미경은 주로 전계 방출(Field Emission) 특성이 우수한 STM을 이용한 방법이 많이 연구되었으나, 최근에는 원자간의 인력과 척력을 이용한 AFM 묘사 기술이 주를 이루고 있다. STM은 전계 방출 하에서 동작하여 전계 특성이 우수하나 묘사 기술에 이용되기에는 문제점이 있다. 첫째, STM은 높낮이 제어가 꿰뚫기 전류의 크기에 의해 이루어지므로, 동시에 영향을 미칠 수 있는 탐침과 시료 사이의 힘이 제어가 되기 어려워 시료 표면이 불규칙적이거나 시료 두께의 변이가

시료 표면의 손상을 일으키는 요인이 될 수 있고, 둘째, 전계 방출에서 시료 표면의 검사는 시료의 화학적 변형을 일으켜서 묘사 기술에 문제점을 유발하는 요인으로 작용할 수 있기 때문이다.

반면에 AFM의 경우는 탐침과 시료 사이의 상호간의 힘에 의존하기 때문에 인가된 전압과 형성된 전류는 서로 독립적이므로 시료 표면과 시료 두께의 변이에도 영향을 받지 않는다. 또한 감광층 물질을 이용하더라도 화학적 변형을 일으키지 않는 장점을 지니고 있다. [Choi 1996, Park 1995]

감광층 물질을 이용한 묘사 기술에는 전자빔 감광층 물질, 고분자 계열의 PMMA(Polymethylmethacrylate), SOG(Spin On Glasses) 등 다양한 감광층 물질이 이용되고 있으며 위의 방법으로 초기 단계의 초미세 패턴의 결과도 보고되고 있다. [Song 1994, Minne 1995b, Choi 1996, Park 1995]

수소로 비산화처리된 Si 웨이퍼 또는 poly-Si 웨이퍼 표면에 전계 방출에 의해 산화막을 형성시켜서 미세 패턴을 형성시키는 방법은 비록 형성되는 막의 두께는 얇지만 산화막과 Si 사이의 선택적 식각에 있어서는 강인한 마스크층으로 작용하게 되며 Stanford의 Quate 연구진은 FET(Field Emission Transistor)의 게이트층의 전극을 AFM을 이용하여 형성하였고 나머지는 광학 묘사 기술을 이용한 "Mix and match" 방법을 이용하여 nMOSFET을 제작하였다. [Minne 1995b]

SPM 석판 기술이 초미세 패턴을 만드는 좋은 도구임에도 불구하고, SPM 석판 기술이 실제 공정에서 양산되기 위해서는 초미세 구조 제작에 적합한 감광 물질의 개발과 가공처리량(through-put ratio) 문제를 해결해야만 한다.

이 기술에 요구되는 감광 물질의 특성은 높은 분해능과 공정의 안정성이다. 적합한 감광 물질 개발을 위하여 스핀 코우팅 방법을 이용한 Terpolymer와 SOG[Choi 1996, Park 1995], LB(Langmuir-Bladgett)법을 이용한 PMPMA(poly-methylphenylmethacrylate)[Schwartz 1997, Kim 1997], SAM(self assembled monolayer)를 이용한 ODMS(Octadecyldimethylmethoxysilane) 등의 감광제들이 개발되고 있다. 현재 SOG 재료는 VLSI 제작 공정에 있어서 평탄화를 목적으로 사용되고 있으며 상용되고 있는 SOG는 유기물의 조성 조건에 따라 Silicate와 Siloxane 형으로 크게 두 종류로 분류될 수 있다. 또한 모든 SOG의 재료는 소자 공정 중에서 평탄성을 양호하게 하기 위해서 사용하는데, 이것은 첨가 물질 혹은 합성 방법에 따라 분류하기도 한다.

AFM 탐침은 정해진 영역을 일정한 속도로 SOG 표면을 누비게 된다. 이 때의 속도와 누비는 영역은, 압전구동자(piezo-scanner)의 이력(hysteresis) 현상으로 인하여 고속 공정이 불가능하며 따라서 속도의 제한 요소가 되고 있다. 속도와 영역의 제한은 곧 실제 공정에서 가공처리량(through-put)의 문제를 야기시키게 된다. 따라서 차세대 소자 공정에 있어서, 생산성을 향상시키기 위한 복수 탐침(multi-tip)에 의한 다량동시석판기술(multi lithography) 개발이 요구되며 복수 탐침을 이용한 방식의 기술 개발도 보고되고 있다. [Minne 1995b] 그러나 실제 생산되고 있는 반도체 소자는 높이 단차가 1 마이크로 이상이 되기 때문에 외팔보

(cantilever)의 유연성의 한계로 인하여 복수 탐침을 이용한 초미세 패턴 제작이 불가능하므로, 다른 측면에서 multi-FEA(field emission array)를 사용한 방식을 이용한 석판 기술의 연구가 요구되어지고 있다.

반도체 공정에서 SPM의 응용은 표면 물성 분석 분야에서부터 석판 기술 분야에 이르기까지 점차 확대되어 가고 있으며 특히, 석판 기술의 응용 분야는 새로운 감광제 물질의 개발과 더불어 공정처리량의 향상을 통해 고집적을 요구하는 차세대 반도체 기반기술에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

tip 에 의해 국소적으로 가한 전기장에 의해서 Si 표면에 생기는 산화 막을 이용한 방법 [Day 1993][Snow 1994]이 있다. AFM 의 contact mode 로 tip 과 시료 사이에 수 V 정도의 전압을 가해도 시료에 가해지는 전기장은 1 V/nm 정도가 된다. 이 정도의 전기장은 핵 주변의 전자가 핵에 의해 받는 전기장에 맞먹기 때문에 여러 가지 화학반응이 가능하게 된다. Si 표면에 양의 전위를 가해주면 주변의 H₂O 가 전해질로 작용하게 되어 산화막(SiO_x)가 성장하는 화학반응이 일어나게 된다. 이렇게 성장된 산화막을 마스크로 이용하여 트랜지스터의 게이트를 100 nm 정도의 폭으로 만든 경우도 있다. [Minne 1995a]

AFM tip 으로 photo resist 를 변형시키는 방법이 있다. AFM tip 표면을 Au 로 입혀서 tip 을 금속의 성질을 띠도록 만든 후 전자빔 용 PR 과 금속화된 tip 사이에 수 V 의 전압을 가해 PR 에 전자를 쏘아주어서 PR 을 변화시키는 방법이다. [Majumdar 1992] 전자를 쏘아준 후 현상시키면 패턴을 얻을 수 있다. 이러한 방법으로 30 nm 정도의 선 폭이 가능하다.

PR 을 변형시키는 방법으로 전압을 통해서 전자를 쏘아주는 것 외에 AFM tip 으로 PR 을 직접 파내거나 [Wendel 1994] 긁어 주는 방법이 있다. [Bouchiat 1996][Sohn 1995] 이 방법은 딱딱한 PR 과 부드러운 PR 을 사용하여 부드러운 PR 을 긁어내는 방법으로 그림자 마스크를 만드는데 적합하다. 이렇게 만들어진 그림자 마스크를 이용하여 conductance 가 게이트 전압에 대해 0.1 V 주기로 바뀌는 SET (single electron transistor) 도 제작되었다. [Bouchiat 1996]

anodic process 를 이용하여 금속 표면을 국소적으로 산화시키는 방법이 있다. 시료 표면에 묻어 있는 습기(H₂O) 를 전해질 용액으로, 시료와 AFM tip 을 전극으로 사용하여 시료 표면에 산화 막을 성장시키는 방법이다. 따라서 이 방법은 습도가 중요한 실험변수로 작용한다. [Sugimura 1993]

부도체 위에 금속을 수 nm정도로 얇게 입힌 후 전압을 가해 산화시키면 그 산화 막이 금속 박막의 밑바닥까지 침투하여 부도체가 된다. 즉 tip 이 스쳐간 자리는 부도체로 된다. 이것을 이용하면 수십 nm 정도의 금속선을 만들 수 있다. 또 같은 방법으로 금속선의 일부를 전압을 가해서 부도체를 만듦으로써 수십 nm 폭의 MIM 접합을 만들 수 있다. 자연 산화 막이 두껍다거나 산화 막의 확산이 잘 일어나는 금속의 경우라면 위와 같은 방법으로 nm 폭의 금속선을 만들 수가 없다. 왜냐하면 위의 방법은 산화 막이 금속박막의 밑바닥을 완전히 뚫는다는 가정 하에서만 가능하기 때문이다. 따라서 산화 막의 조직이 치밀하여 확산이 일어나지 않는 금속이 많이 쓰이는데 그 대표적인 것이 Al 과 Ti 이다. 실제로

위와 같은 방법으로 Ti 박막을 STM 으로 nanolithography 사용하여 SET 를 만든 경우도 있고 [Matsumoto 1996] Al 금속선의 conductance 가 선 폭의 변화에 따라서 양자화되어 변하는 것을 본 실험도 있다. [Snow 1996]

위와 같은 탐침 현미경을 이용한 패턴 제작 기술은 패턴 제작의 속도가 느리기 때문에 대규모 양산에는 적합하지 못한 것으로 생각되었다. 그러나 최근에는 이러한 속도의 문제를 해결하기 위한 시도가 많이 행해지고 있다. 그 대표적인 것이 여러 개의 탐침을 한 칩에 배열하여 한번의 스캔으로 패턴을 여러 개 만드는 방법이다. 배열된 탐침의 개수에 비례하여 패턴 제작 속도가 증가되는 셈이므로 한 개의 전자빔을 훑는 식으로 패턴을 제작하는 전자빔 패턴 제작 기술보다 훨씬 높은 제작 속도를 얻을 수 있다.

보통의 탐침 현미경은 외팔보(cantilever)의 휨을 측정하기 위해 레이저를 이용한다. 그러나 위의 경우처럼 탐침의 배열을 사용하는 경우에는 탐침의 개수만큼의 레이저가 필요하게 되기 때문에 레이저를 이용한 외팔보의 휨 측정은 현실적으로 불가능하다. 따라서 레이저를 사용하지 않고 휨을 측정할 수 있는 외팔보가 필요한데 최근에 압전 저항 외팔보가 개발되어 이러한 문제를 해결하게 되었다.

최근에 50 개의 압전 저항 외팔보를 이용하여 패턴 제작 속도를 증가시켰다. [Minne 1995b, 1996, 1998] 50 개의 압전 외팔보는 각각 독립적으로 제어되기 때문에 시료 표면의 거친 정도에 무관하게 50 개 각각의 탐침과 시료 사이의 거리를 일정하게 유지시킬 수 있고 따라서 제작된 패턴도 매우 안정적일 수 있다. 또 각각의 탐침에 독립적으로 전압을 가할 수 있기 때문에 50 개의 주기적인 모양을 만들 수 있는 것은 물론 각기 전혀 다른 모양의 패턴도 제작할 수 있어 그 응용 범위가 넓다고 하겠다.

강유전체는 오래 전부터 전기용량들이나 가열 전기효과를 이용한 센서, actuator 등에 많이 이용되어 왔다. 최근에는 비휘발성 기억 소자인 FRAM에 이용되면서 다시 그 관심이 고조되고 있다. 그런데 이러한 소자로의 응용이 활발히 되면서 강유전체의 미세구조에 대한 이해가 점점 중요해지고 있고 따라서 강유전체의 구역 관찰을 나노 규모 정도까지 자세히 할 필요성이 많아지고 있다. 이런 가운데 기존의 강유전체 구역 관찰의 방법인 식각, 액정입힘, 가는 입자 입힘, SEM, TEM, X-ray 등과 같은 방법들보다 힘 훑기 현미경이 표면모양과 구역 이미지를 동시에 나노 규모로 그것도 특별한 시료 준비 없이 관측할 수 있는 도구로서 활발히 연구되고 있다.

힘 훑기 현미경을 이용한 최초의 강유전체 구역 관찰은 1990년 미국IBM의 Saurenbach와 Terris가 비접촉식 전기힘 현미경을 이용하여 $Ga_2(MoO_4)_3$ 즉 GMO의 표면 전하의 이미지를 얻어 이루어졌다[Saurenbach 1990]. 그후 스위스의 Lüthi 등이 힘 훑기 현미경을 이용하여 GASH ($C(NH_2)_3Al(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)라는 강유전 결정을 접촉식에서는 옆힘을 측정하여 구역 이미지를, 비접촉식에서는 구역 벽을 관측하였다 [Lüthi 1993]. 독일의 Franke 등은 광섬유를 이용한 접촉식 전기힘 현미경으로 주

어준 교류 전압의 첫번째어울림으로 PZT박막의 압전효과와 편극을 측정하고 두번째 어울림으로는 전기일그러짐과 유전율을 측정하여 PZT 박막의 구역을 관측하고 극성을 바꾸기도 하였다[Franke 1994]. 일본의 Kolosov와 Gruverman 등은 접촉식 원자 힘현미경으로 GASH 시료의 압전효과를 측정하여 강유전체의 구역을 보았다[Kolosov 1995]. 일본의 Takata는 PZT의 압전 특성을 strain image를 통해 얻기도 하였다[Takata 1996]. 독일의 Bluhm 등은 TGS ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$)를 전기힘 현미경으로 관측하기도 하고[Bluhm 1996], 옆힘현미경으로 관측하기도 하였다[Bluhm 1998].

우리 연구진은 접촉식 전기힘 현미경으로 같은 실험을 TGS로 하여 걸어준 교류 전압에 대한 진동이 접촉시에도 여전히 남아 있음을 관측하였고[Hong 1998a] 우리는 이를 Kolosov가 말한 압전효과에 의한 진동이 아니라 강유전체 편극으로 인한 표면 전하가 탐침과의 전기적 상호작용으로 흔들리는 것으로 해석하고 이를 동적 접촉식 전기힘 현미경이라고 명명하였다[Hong 1999]. 또한 이를 이용하여 TGS와 PZT의 강유전 구역을 뒤집을 수도 있었다[Hong 1998b]. 그 후 KAIST 노광수 그룹과 삼성 종기원에서 우리의 해석을 확인해 주었다[preprint].

우리가 개발한 접촉식 전기힘현미경은 표면 굳기에 대한 힘 변조 현미경으로, 표면 전위 분포에 대한 전압계로도 사용될 수 있다. 또한 접촉식 전기힘현미경은 재래의 비접촉식 전기힘현미경보다 훨씬 더 나은 공간 분해능을 보여줄 뿐 아니라 표면 전기적 성질도 보다 깨끗하게 측정할 수 있다. 더욱이, 표면굴곡, 표면전위, 그리고 표면 전하 영상은 접촉식 전기힘현미경에 있어 서로 잘 분리되어 속박된 표면 전하밀도의 수량적 계산과 구역 구조의 제어를 가능하게 한다.

현재 0.10 μm 이하의 최소 선폭 구현을 위하여 여러 방향의 연구가 진행중이며 그 중 몇 가지를 예로 들면, X-ray Lithography, Scanning 형태의 Single Electron Beam에 의한 Lithography, Phase Shift Mask를 이용한 광학 Projection Lithography, SPM (Scanning Probe Microscope)을 이용한 Multi Cantilever Lithography 등을 들 수 있다.

위와 같이 여러 가지 방향으로 연구가 진행되고 있지만, 여러 가지 문제점으로 아직까지 실제 공정에 적용할 만 한 구체적인 형태의 기술은 아직까지 보고되지 않고 있는 실정이다. [Tompson, 1983]

현재 나노위치 측정/제어분야에서 가장 연구가 활발한 곳은 미국인데 미국립표준기술국인 NIST가 선도적인 역할을 하고 있다. NIST에서는 Sematech와 상무성의 "Advanced Technology Program"을 통해서 연구가 진행되고 있는데 현재의 나노 위치 측정/제어관련 주요 연구내용 및 추진상황은 표1과 같다. NIST에서의 나노 위치 측정/제어 관련 연구는 nanoscale metrology 실험실에서 주로 이루어지고 있으며, 기타 microscale 실험실과 X선 실험실에서 수행되고 있다. 이런 연구의 주목적은 반도체 및 data storage 산업의 인프라 구축에 목표를 맞추어 진행되고 있다.

표 2.1. NIST의 나노 측정/제어 관련 연구

제 목	내 용
Molecular Measuring Machine	1987년부터 시작된 과제로 계속 진행되고 있는 과제인데 50 mm × 50 mm 측정영역에서 1 nm의 측정불확도를 목표로 하고 있으며 현재 20 nm의 불확도를 갖고 있다.
Calibrated AFM	AFM을 metrological 목적으로 사용하고자 개발되고 있으며 PSI사와 협동 연구로 진행되었다. 현재 실리콘의 single crystal step 측정연구가 계속되고 있다.
Metrological SEM	전자현미경에 metrological frame를 부착하여 선폭 피치 등의 측정을 목적으로 하고 있으며 SEM과 AFM결합시스템을 회사와 공동으로 진행하고 있으며 배울교정시편을 개발하여 현장에 보급하고 있다
Optical Microscope	Mask선폭, Overlay측정을 목적으로 green과 UV를 광원으로 사용하고 있으며 선폭표준시편은 보급 중에 있으며 overlay은 현재 개발 중에 있다.
Flatness Measurement System	300 mm구경의 대형 렌즈, wafer의 형상 및 평면도측정을 목적하고 있으며 수 nm의 정확도를 목표로 하고 있다.
Tip Correlation 및 계측기 상호 호환성	AFM이나 stylus의 형상에 따른 측정 효과 및 선폭측정시 여러 측정 기법에 따른 호환성을 연구하고 있다.
초정밀 길이측정시스템	'96년부터 수행된 과제로 수십 cm 범위에서 nm의 정확도를 얻기 위한 거리측정 tool 및 stage개발을 목표로 하고 있으며 기존의 레이저 간섭계의 비선형성 축소, frequency tracking interferometer, x-ray interferometer등을 연구하고 있다.
Atomic reference material	기존의 인공적인 기준물이 아닌 자연계에 존재하는 원자나 분자를 이용한 기준 개발

독일의 PTB에서는 EU회원국과 함께 COXI개발 연구가 진행되고 있으며 전자현미경을 이용한 long range 2차원 측정기와 마스크 측정을 위한 광학적 방식의 long range 2차원 측정기 개발이 이루어졌으며 AFM과 STM을 사용한 측정 목적의 short range metrological SPM 개발 연구를 수행하고 있다. 그리고 레이저간섭계의 정확도를 높이기 위해 광학적 방법으로 비선형성을 축소시키는 연구가 계속되고 있다. 그밖에 영국의 NPL, 이태리의 IMG, 일본의 NRLM등에서 나노 위치 측정/제어 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다[Crandall 1996, Sematech 1997, www a,b,c,d]. 상업적인 측면에서는 대구경화에 따른 측정 스테이지의 확장과 선폭의 미세화에 따라 광학적인 측정기에서는 UV 광학계를 적용하고 있으며 SEM의 경우 deep contact hole 측정을 위해 콘트라스트를 향상시키는 추세이다. 또한 AFM이 선폭 측정 tool로 적용되고 있어 대구경 웨이퍼를 측정할 수 있도록 하거나 측정속도를 높이려고 하고 있다. 그러나 아직 측정 센서의 수준이 낮은 편이고 웨이퍼의 전 범위에 대한 위치 측정은 이루어지고 있지 않다.

나노 위치 측정/제어분야의 국내 수준은 통합적인 연구보다는 부분적으로 이루

어지고 있다. 한국과학기술원에서는 stage기술, 광학적인 probing기술에 관한 연구가 진행되고 있으며 실용화된 기술로 3차원측정기, 광학식 micro feature 측정 시스템 등이 있다. 서울대학교에서는 micro flexure, 정밀가공기 및 측정기의 교정기술 등의 성과가 있다. 연구계에서는 전자통신연에서 stepper개발을 목표로 정렬이나 노광 광학계에 많은 연구를 하였다. 기타 기계연이나 생기연등에서 stage에 관련된 연구 실적이 있다. 산업계로는 반도체 3사에서 자체 회사에서 사용되고 있는 계측기의 정확도 확보를 위한 일이 진행되었으며 반도체 관련 초정밀 길이측정기에 대한 관련 산업은 아직 형성되지 않고 있다. 그러나 일부 회사에서 3차원측정기와 광학적측정기를 개발하여 국내에 상당량 보급되고 있는 실정으로 일부의 기반은 확보하고 있다고 볼 수 있다. 최근 PSIA에서 wafer를 검사할 수 있는 long range AFM를 개발 시판하고 있다. 여하튼 이런 국내의 기술은 나노미터 수준이라고는 할 수 없으며 전반적으로 매우 취약한 실정이다. 반도체의 경우 공정기술은 세계적으로 최고의 수준이며 차세대 반도체 제조기술, 원자 분자 제어 및 조작기술은 회사와 학계, 연구계를 통해 상당한 수준에 접근하고 있으나 측정 분야는 매우 열악하다.

한편 표준과학연구원에서의 나노 위치 측정/제어 관련 연구를 몇 개 분야로 나누어 살펴 보면 다음과 같다.

정밀스테이지에 관한 연구는 오래 전부터 수행되어 본 그룹의 많은 측정시스템에 공기베어링이 사용되고 있으며 flexure를 이용한 마이크로스테이지들 또한 각종 시스템에 부착되어 nm 수준으로 제어하고 있다. 전자력을 이용한 가이드와 테프론 패드를 이용한 정밀베어링을 제작하여 metrological AFM에 적용하고 있으며 기타 공기베어링식 로타리테이블도 개발하였다.

레이저간섭계 분야에서는 요오드 안정화레이저와 같은 표준기급 레이저를 개발하여 국가길이표준으로 삼고 있으며, 다양한 종류의 안정화레이저가 개발되어 길이 측정장치에 사용되고 있다. 비선형성에 대한 연구도 진행되어 공기굴절율측정간섭계에 적용하고 있으며 현재의 수준은 1 nm 정도이다.

Probing분야에서는 SEM을 이용한 선폭측정 연구에서 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 선폭측정의 정확도를 향상시켰으며 현재 nano tube의 정제 및 부착에 관한 연구가 진행되고 있다.

성능평가 분야에서는 레이저 간섭계와 초정밀길이센서의 정확도를 평가하기 위한 X선 간섭계를 개발하였으며, stage의 운동오차를 측정할 수 있는 기술을 확보하고 있다. 기타 Fabry Perot간섭계에 레이저 주파수를 locking시킬 수 있는 기술과 이에 필요한 반도체레이저의 주파수 안정화 및 tuning기술을 확보하고 있다.

끝으로 측정시스템에 있어서는 레이저간섭계와 2중 stage 및 SEM을 이용한 선폭측정장치를 개발하였으며, 미세입자의 직경을 측정할 수 있는 산란 장치를 개발하여 입도 표준을 확립하였다. 또한 diffractometer를 이용한 피치측정장치를 개발하였으며, 레이저간섭계와 nano센서 및 2중 stage를 이용한 metrological AFM을 개발 중에 있다.

결론적으로 국외의 경우 본 과제가 목표로 하는 Nano-lithography용 metrology

system에 접근하고 있으나 아직 실용적인 기술수준에는 미치지 못하고 있으며 좀 더 정확한 calibration 방법이 필요한 단계이고, 국내의 경우 기준점을 정확히 설정하여 통합된 metrology frame으로부터 절대 좌표를 측정하는 기술 개발이 이루어지지 않아 시스템의 정확한 평가를 못하고 있었으나 본 연구결과로 인하여 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 범위에서 나노미터 수준의 불확도로 위치결정이 가능하게 되었다.

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 비접촉 모드와 자기힘 현미경

패턴을 기록하는 매체로 리지스트 뿐만 아니라 강유전체나 강자성체가 사용될 수 있고 강자성체의 경우에는 이미 데이터 저장 장치로 많이 사용되고 있다. 이러한 강유전체나 강자성체에 패턴되는 정보가 집적화됨에 따라 패턴을 더 좋은 분해능으로 볼 수 있는 장비가 필요하게 되었고 탐침 현미경이 이에 적합한 도구로 생각되어지고 있다. 그러나 탐침 현미경을 시료의 표면에 접촉하여 사용할 경우에는 시료표면의 거칠기 정보가 시료의 전기적 자기적 신호와 합쳐져서 나타나게 되므로 순수한 전기적 자기적 신호를 얻을 수 없게 된다. 따라서 시료 표면의 거칠기 정보와는 완전히 분리된 전기적, 자기적 신호를 얻을 수 있는 방법이 필요하다.

전기적 자기적 힘들은 대체적으로 긴 범위 힘이기 때문에 시료와 탐침사이의 힘을 측정하여 시료의 정보를 알아내는 탐침 현미경의 경우에는 탐침을 시료에 굳이 접촉시키지 않아도 된다. 이 경우에는 시료와 접촉되어 있지 않기 때문에 시료의 거칠기 정보를 완전히 제거한 순수한 전기적 자기적 힘의 정보만을 얻을 수 있다. 그러나 탐침이 시료로부터 어느 정도 떨어져 있기 때문에 신호가 미약하여 직접 외팔보의 휨만을 측정하여 전기적 자기적 힘의 정보를 얻는 것이 매우 어렵다. 따라서 이러한 힘의 미세한 변화를 민감하게 측정할 수 있는 방법이 필요한데 이것이 탐침의 공명을 이용하는 방법이다. 공명 주파수 부근에서 탐침의 진동 진폭은 매우 민감하게 변하므로 미세한 힘의 변화도 큰 신호로 증폭되어 나타나게 된다.

본 연구에서는 이런 식으로 탐침을 공명 주파수 부근에서 진동시키는 방법을 통해 시료의 국소적인 자기마당의 정보를 알아내는 방법을 개발했으며 이를 이용하여 강자성체의 자기 구역을 관찰했다.

1. 탐침과 시료 사이의 상호 작용

여기서는 자기 탐침과 자기 시료 사이의 힘의 미세한 변화를 측정할 수 있는 원리를 설명하고 자기력, 정전기력, 반데르발스 힘이 탐침과 시료사이의 거리에 따라 어떻게 작용하는지를 간단한 모델을 통하여 논의하여 보았다.

(1) 상호작용 측정 원리.

자기힘 현미경에서 자기 탐침³⁾과 자기 시료사이의 상호작용을 측정하는 원리는 그림 3-1-1(a)에서처럼 외팔보를 시료 표면에 수직인 z-방향으로 하나의 질점 m이

3) Park Scientific Instrument, Sunnyvale, CA.

일차원 강제 조화 진동하는 운동 방정식으로 고찰함으로써 이해될 수 있다[Sarid 1991].

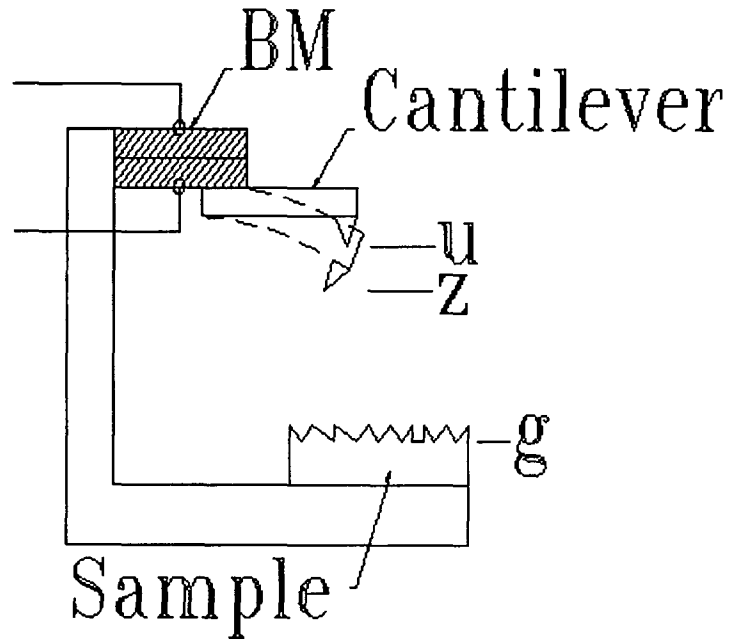


그림 3-1-1(a) 자기힘 현미경 장치의 개요도

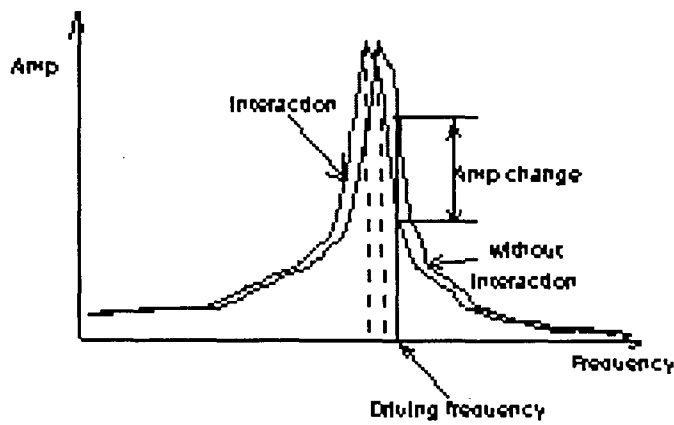


그림 3-1-1(b) 탐침과 시료사이의 힘의 변화에 따른 공진 주파수의 변화

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial z}{\partial t} + k(z - u) = F(z) \quad (3-1-1)$$

여기서 탐침과 시료의 상호작용하는 힘 $F(z)$ 는 다음과 같이 간단히 근사될 수 있다.

$$F(z) = F_0 + F'(z_0)\zeta \quad (3-1-2)$$

F_0 는 쌍떨개가 외팔보를 진동시키지 않을 때의 평형점, $z = z_0$, 에서 외팔보에 작용하는 힘이고 F' 와 ζ 는 z 에 대한 힘의 미분 값과 평형점, $z = z_0$, 주위의 미세 진동 변위를 각각 나타낸다. 쌍떨개의 위치 u 와 외팔보의 위치 z 는 다음과 같이 각각 표현될 수 있다

$$u = u_0 + a \exp(i\omega t) \quad (3-1-3)$$

$$z = z_0 + \zeta. \quad (3-1-4)$$

그러면

$$m \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial t} + k(\zeta - a \exp(i\omega t)) = F'(z_0)\zeta \quad (3-1-5)$$

진동하는 외팔보의 진폭은 다음과 같이 주어진다.

$$A_b(\omega, F') = \frac{ak}{k' - \omega^2 m + i\omega\gamma} \quad (3-1-6)$$

여기서 $k' = k - F'$ 이다. 구동 주파수가 공진주파수 근처, $\omega \sim \omega_0$, 일 때, 부분적인 힘의 미분값 F' 때문에 공진주파수가 $\Delta\omega_0 \sim \omega_0(F'/2k)$ 만큼 이동할 것이다. 그림 3-1-1(b)는 공진주파수에서 이러한 이동 때문에 구동 주파수 $\omega = \omega_m$ 에서 외팔보 진동의 진폭의 변화를 공진 곡선(resonance curve)을 통하여 보여주고 있다. 이때 진폭변화 ΔA_b 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta A_b(\omega = \omega_m) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{Q}{k} A_{\omega} \Delta[F'] \quad (3-1-7)$$

그림 3-1-2는 이러한 진폭변화를 위상맞춤 증폭 기술을 이용하여 측정하고 그 값이 일정하도록 하는 되먹임 회로의 개략도이다. 이 때 PZT 튜브의 z 방향으로 늘어나게 하는 길이(혹은 전극 전압)를 탐침의 각 위치에 따라 데이터로 취하면 힘의 물대로 이루어진 3차원 영상을 얻을 수 있다. 이 실험에서 얻은 데이터는 모두 이러한 방식을 이용하여 얻은 것이며 특별한 이미지 정보 처리를 하지 않은 데이터이다.

(2) 상호작용에 대한 모델과 토의

자기 구조에서 도메인 크기가 유한하고($\sim \mu m$) 탐침의 자기 쌍극자가 시료 표면으로부터 상당히 멀리 있을 때는 시료의 도메인은 하나의 자기 쌍극자로 보이게 되므로 이 위치에서는 자기 쌍극자-자기 쌍극자 상호작용으로 볼 수 있다[Valera 1995]. 반면에 아주 가까이($\sim nm$) 갔을 때는 도메인 영역을 하나의

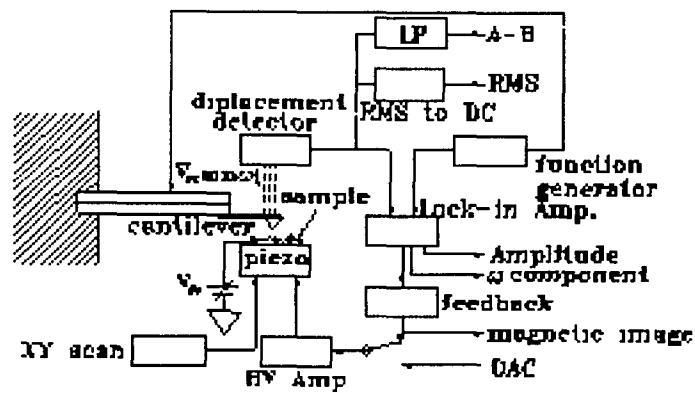


그림 7-1-2 진폭변화를 위상맞춤 증폭 기술을 이용하여 측정하고 그 값이 일정하도록 하는 되먹임 회로의 개략도

일정한 자기장을 내는 평면으로 생각할 수 있으므로 탐침에게는 일정한 자기장에 의한 자기력을 느끼게 된다. 따라서 자기 상호작용에 대하여 그림 3-1-3(a)과 같은 모델을 가정하는 것은 타당하다. 여기서 되먹임 안정성을 유지하기 위해 탐침과 시료 사이에 일정한 직류 전압을 가해 줄 경우 자기 상호작용과 반데르발스 힘에 정전기력이 부가적으로 탐침과 시료 사이의 상호작용에 들어가게 된다. 여기서 반데르발스 힘과 정전기력의 역할은 탐침이 하나의 도메인 영역에서 다른 도메인 영역으로 넘어갈 때 피드백 극성을 일정하게 만들어 줌으로써 탐침이 시료에 부딪침이 없이 일정한 피드백 조건을 유지할 수 있도록 만들어 준다[Bochi 1995]. 자기 구조 때문에 에러 신호가 발생할 때 이를 없애는 방향으로 피드백이 작용하는 경우 반데르발스 힘과 정전기력에서 보완하는 힘을 제공하기 때문에 이를 servo force라고 부르기도 한다. 그런데 servo force 자체는 탐침과 시료의 정전압 V_{dc} 의 의존성이 있기 때문에 우리가 조절할 수 있는 힘이다. 따라서 이런 의존성에 대한 확실한 이해는 보다 체계적인 실험을 위해서는 반드시 필요하다. 따라서 여기에 대해 잠시 논의해 보기로 하자.

그림 3-1-3(b)는 탐침과 시료사이의 거리에 상호작용하는 힘들의 z 에 일차 미분했을 때 값을 나타내고 있다. 이 때 상호작용하는 힘들의 합력을 z 에 일차 미분했을 때 값이 영이 되는 탐침과 시료사이의 거리 D 는 피드백 조건에서 하나의 중요한 변수인데 F'_{Servo} 자체가 정전기력을 포함하기 때문에 탐침과 시료사이의 전압에 대한 의존성을 가지게 된다. 이를 좀더 살펴보기 위해 자기 시료의 경우 lock-in 출력 A_b 의 변화는 (3-1-7)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta A_b(\omega = \omega_m) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{Q}{k} A_w \Delta[F'_m + F'_{Servo}] \quad (3-1-8)$$

여기서 $F'_{Servo} = F'_{vdw} + F'_c$ 로 정의하고 d 를 탐침과 시료 사이의 거리로 나타내자. $d > D$ 일 때는 하나의 자기 도메인에서 다른 자기 도메인으로 넘어 갈 때 피드백의 극성이 바뀌어 탐침이 시료표면에 충돌하므로 자기구조의 관찰이 불가능하다. 반면에 $0 < d < D$ 일 때는 자기력이 인력이나 척력이나에 관계없이 항상 일정한 피드백 극성을 가지기 때문에 안정된 조건하에서 자기 도메인의 구조를 관찰 할 수 있다. d 가 $0 < d < D$ 가 되도록 피드백 기준전압과 스텝핑 모터로 자기 탐침을 맞추었을 때 시료 표면이 거의 평평하고 자기 탐침이 한 영역에서 다른 영역으로 넘어갈 때 자기 힘의 일차 미분 값이 $\Delta F'_m$ 만큼 있다고 하면 Lock-in에서 출력이 일정하도록 피드백이 되어야 하므로 $\Delta A_b(\omega = \omega_m) = 0$ 가 된다. 이를 위해 PZT가 늘어나는 길이 Δz 는 다음과 같이 표현된다[Guntherodt 1992].

$$\Delta z \approx \left[\frac{-\Delta F'_m}{\frac{\partial F'_{Servo}}{\partial z}} \right]_{z=z_0} \quad (3-1-9)$$

(3-1-9)에서 볼 수 있듯이 F'_{Servo} 가 탐침과 시료사이의 거리에 대한 의존성이

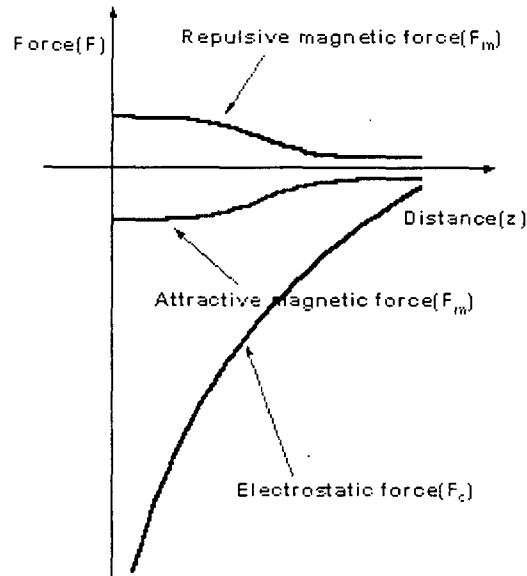


그림 3-1-3(a) 거리에 따른 탐침에 작용하는 힘의 변화

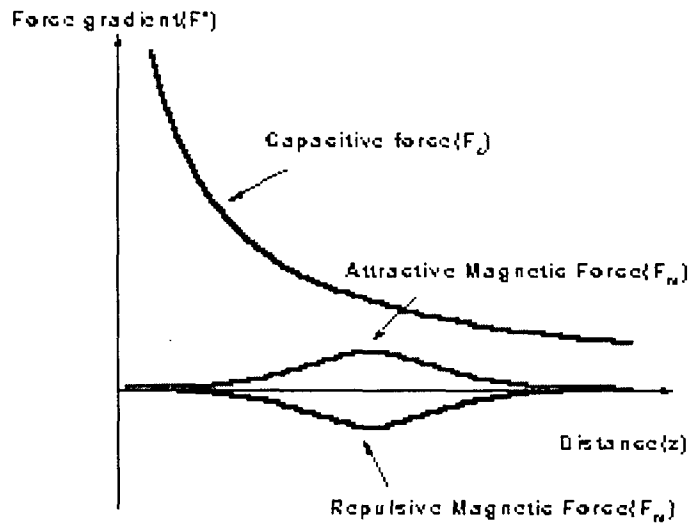


그림 3-1-3(b) 거리에 따른 탐침에 작용하는 힘의 미분값의 변화

있기 때문에 자기힘 현미경 image를 얻을 때 contrast 변화 Δz 도 거리에 따라서 달라진다. 가장 좋은 자기 구조 영상을 얻기 위해서는 최적의 민감도를 가지는 위치에서 imaging을 할 필요가 있다. 이 경우 평평한 자기 시료 표면의 경우에는 자기힘 현미경 상 자체는 자기힘 물매들의 등고선에 해당된다.

탐침이 시료에 아주 가까이 갔을 경우 즉 $0 \approx d \ll D$ 일 때는 그래프에서처럼 $\frac{\partial F_{Servo}}{\partial z} \gg 1$ 이므로 topography 신호가 자기 신호보다 우세하게 된다. 반면에 탐침이 시료에 멀리 떨어진 경우 즉 $0 \ll d \approx D$ 일 때는 그래프에서처럼 $\frac{\partial F_{Servo}}{\partial z} \ll 1$ 가 되어 자기신호가 가장 민감한 영역이 된다. 따라서 이 영역에서는 탐침이 시료 표면에 충돌할 위험은 있지만 가장 명확한 자기 구조를 관찰할 수 있는 장점이 있다. 반면 시료로 멀리 떨어지는 효과 때문에 수평방향 성분이 평균되어 수평분해능이 떨어지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서는 자기힘 현미경 신호에서 topography 효과를 분리시킬 필요가 있다.

2. 실험 방법

여기서는 자기힘 현미경의 mechanical part, 피드백 회로 및 software에 추가된 부분에 대하여 설명하고 이를 이용하여 앞절에서 논의한 내용을 측정된 결과를 소개하고자 한다.

1) 자기힘 현미경의 제작

자기힘 현미경에 외팔보를 시료에 대해 쉽게 옮길 수 있고 sample 표면에서 깨끗한 부분을 찾아갈 수 있도록 CCD 카메라와 X-Y translation stage를 설치하였다 (그림 3-1-4). 이 때 1000배 정도 확대할 수 있도록 광학 현미경을 함께 장착하여 탐침과 시료 표면 시스템을 확대함으로써 외팔보의 상태, 시료표면의 수십 마이크론 크기의 먼지 입자, laser alignment 상태 등을 쉽게 점검 할 수 있어 보다 안정된 탐침-시료 실험 환경을 유지할 수 있었다. 이외에도 PZT scanner를 최대 $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ 까지 볼 수 있도록 하였고 자기 탐침을 자화시키기 위해 표면자기장이 2000가우스 되는 Nb계 자석을 탐침 자화기로 사용하였다. 피드백 회로에 있어서는 proportional type 뿐과 integral type을 함께 사용하였다. 각 type들은 각각 독립적으로 또는 함께 사용할 수 있도록 하였으며 사용되어 지는 주파수 영역대도 바뀔 수 있도록 함으로 피드백을 최적화 하였다. 탐침을 진동시키기 위해서 HP function generator(10MHz까지 가능)를 사용하여 고유진동수가 높은 탐침도 이용할 수 있도록 하였다. 따라서 기존에 스프링 상수가 작은 외팔보로 자기구조를 영상화 할 때 자주 발생하던 탐침이 오염층(contamination layer) 혹은 adhesive layer에 trapping 되어지는 것을 딱딱한 외팔보를 사용함으로써 피할 수 있다. 그리고

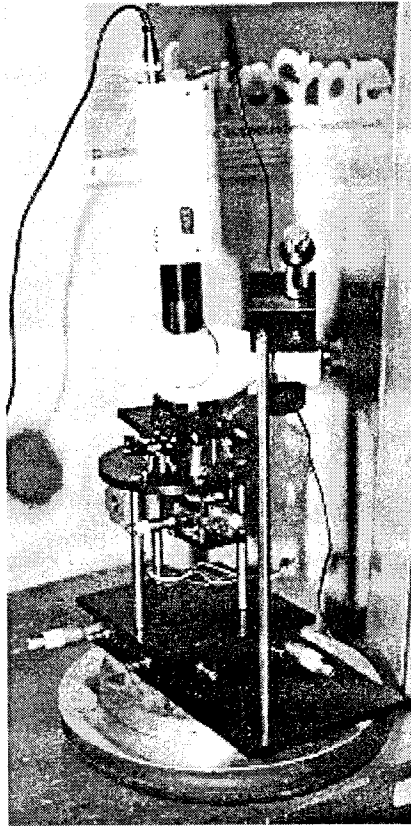


그림 3-1-4 제작된 MEM

이러한 주파수 영역을 처리할 수 있는 lock-in amplifier(EG & G)를 사용하였다. 또한 앞절에서 설명한 탐침과 시료사이의 상호작용을 거리에 따라 측정하고 최적의 실험 조건을 얻기 위해서 컴퓨터에서 Z-고전압 부분에 입력전압을 조금씩 증가시키면서 lock-in의 출력을 받아들일 수 있는 프로그램과 회로를 제작하였다. 그 결과로부터 탐침을 적절한 위치에 위치시킴으로서 탐침과 시료표면 사이의 상호작용을 직접적으로 이해할 수 있다. 그리고 topography 효과를 자기신호로 분리시킬 목적으로 탐침과 시료사이의 전압을 변화시킬 수 있도록 하였다.

2) 탐침과 시료표면 사이의 거리에 따른 상호작용 측정

그림 3-1-5는 탐침과 시료사이의 거리를 변화시킴에 따라 lock-in 출력 X와 힘의 변화를 측정한 결과이다. 이때 외팔보의 힘은 평형 위치 z_0 로 결정되기 때문에 다음과 같은 방정식에 의해 그 값이 결정된다.

$$k[z_0 - u_0] = \langle F_m \rangle_{t, z=z_0} + \langle F_{Servo} \rangle_{t, z=z_0} \quad (3-1-10)$$

여기서 u_0 는 쌍떨개의 평균위치를 나타내고 $\langle \dots \rangle_t$ 는 시간에 대한 평균이다. 이 때 탐침과 시료사이의 일정한 전압 V_{dc} 가 걸린 경우 $\langle F_{Servo} \rangle_t$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\langle F_{Servo} \rangle_t = \frac{1}{2} \left\langle \frac{\delta C_{tip}}{\delta z} \right\rangle_t V_{dc}^2 + \langle F_{vdw} \rangle_t \quad (3-1-11)$$

여기서 C_{tip} 은 탐침과 시료 사이의 축전 용량을 나타내고 V_{dc} 는 탐침과 시료사이의 직류 전압을 나타낸다. 이 곡선에서 나타난 거리 의존성에서 볼 수 있는 것은 그림 3-1-1(b)에서 말한 효과와 그림 3-1-3(b)의 거리 의존성을 고려해보면 탐침이 시료에 점점 접근함에 따라 진폭이 줄어든다는 사실을 이해할 수 있다. 이 때 수식 (3-1-10)에서는 외팔보 힘을 측정했을 경우에도 자기 정보 F_m' 에 의한 효과는 나타남을 알 수 있는데 이를 위해서는 지금 보다 노이즈가 적은 전자회로의 구현이 필요하다고 생각되어 진다. 어쨌든 이런 곡선을 얻은 다음 가장 민감한 거리를 피드백의 기준전압을 변화시키거나 스텝핑 모터를 이용함으로써 최적의 실험 조건을 찾을 수 있다.

3. 실험 결과

탐침과 시료사이에서 앞에서 논의한 거리의 의존성이 실제로 자기힘 현미경의 image에서는 어떻게 나타나는지를 알아보기 위해 상업용 광자기 디스크로 많이 쓰이는 TbFeCo 박막의 표면에 대하여 실험하였다.

TbFeCo 박막을 유리기판 위에 스퍼터링으로 300 nm의 두께로 입혔다. 그림 3-1-6(a)는 탐침의 진동 진폭이 48 nm 일 때의 image이다. TbFeCo의 자기 구역의 구조가 잘 나타났다. 탐침을 시료와 접촉시켰을 때의 image가 3-1-6(b)이다. 3-1-6(a)에서는 자기 구역의 구조만이, 3-1-6(b)에서는 시료의 topography 만 드러

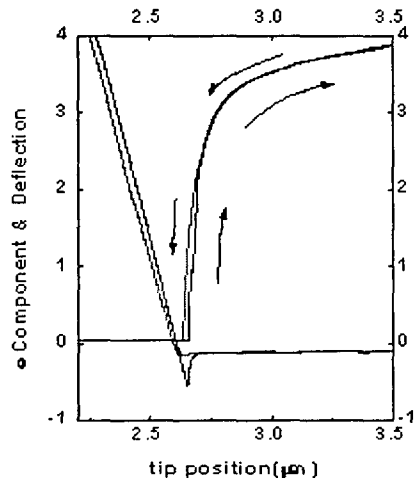
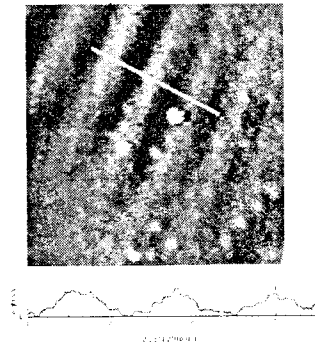


그림 3-1-5 탐침과 시료사이의 거리를 변화시킴에 따라 lock-in 출
 화를 측정된 결과



(a)

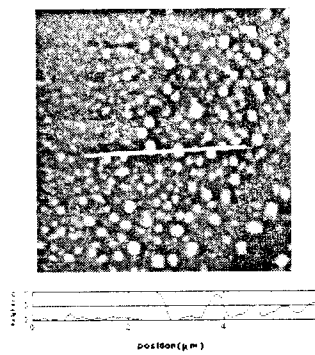


그림 3-1-6 (a)는 탐침의 진동 진폭이 48 nm 일 때의 MFM image 이다. TbFeCo 의 자기 구역의 구조가 잘 나타났다. 탐침을 시료와 접촉시켰을 때의 image 가 (b) 이다. (a)에서는 자기 구역의 구조만이, (b)에서는 시료의 topography 만 드러났다.

난다. 따라서 이러한 방법으로 시료의 topography 정보와 완전히 분리된 자기마당 구조를 알아낼 수 있다.

4. 요약

자기힘 현미경에 CCD, X-Y translation stage, 적분형 피드백 회로, $40\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ 을 주사할 수 있는 PZT scanner를 추가하였고, stiff한 외팔보의 사용을 가능하게 할 수 lock-in 증폭기와 function generator를 구동할 수 있는 회로와 소프트웨어, 탐침과 시료사이에서 외팔보의 휨과 진폭변화를 측정할 수 있는 회로와 소프트웨어 개발하였다. 이런 개선을 통하여 자기힘 현미경을 보다 용이하게 동작시킬 뿐만 아니라 자기 탐침과 자기 시료의 상호작용에 관하여 보다 체계적으로 연구할 수 있었다. 특히 피드백의 안정성을 유지하기 위해 자기 시료 사이에 일정한 직류전압을 가하였을 때 정전기적 상호작용이 미치는 영향에 대해 간단한 모델을 통하여 포괄적으로 논의하였다. 그 결과는 자기힘 현미경 image가 탐침과 시료사이의 거리에 크게 의존하고 있음을 확인할 수 있었고 보다 탐침의 위치 d 가 상호작용하는 힘들의 합력을 z 에 일차 미분했을 때 값이 영이 되는 탐침과 시료사이의 거리 D 근처에 있을 때 imaging contrast 조건이 가장 좋음을 이해할 수 있었다. 그러나 거리가 멀어짐에 따라 수평분해능이 떨어지고 피드백 조건을 잃어버릴 가능성이 많을 뿐만 아니라 피드백 기준전압과 스텝핑모터로 정교하게 탐침을 위치시키기 어려운 점이 해결해야 할 과제이다. 전자의 경우 이를 해결하기 위한 대안으로 변조된 정전기력을 이용하여 topography 효과를 자기 신호에서 분해시키는 방법을 제시하였다. 여기서 상업용 컴퓨터 기록매체로 사용되는 groove를 가지는 TbFeCo 박막을 시료로 하여 실험함으로써 이러한 효과들에 대하여 비교 분석하였다. 자기구역에 대한 정보를 명확하게 알 수 있었으며 탐침과 시료 사이의 거리가 멀어짐에 따라 topography 에 대한 신호가 사라져서 순수한 자기힘의 정보를 얻을 수 있었다. 거리가 너무 멀어지면 자기힘 역시 약해지므로 적절한 탐침과 시료 사이의 거리가 자기힘 정보를 얻는데 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

분해능은 약 300 nm 정도이지만 좀더 개선하면 고밀도 자기기록 매체를 분석하는 좋은 도구가 될 수 있으리라 본다.

제 2 절 두드리기 모드의 개발과 미세 식각에의 응용

3장 1절의 내용에서 보듯이 탐침 현미경으로 시료의 표면을 분석하는 방법에는 크게 접촉 방식과 비접촉 방식이 있다. 접촉방식에서는 탐침이 시료의 표면과 직접 접촉하여 시료를 분석하기 때문에 분해능이 매우 좋다. 그러나 부드러운 시료의 경우 탐침이 시료를 손상시킬 수 있고 또 강한 수평방향의 힘 때문에 문제가 생길 수 있다. 이에 비접촉 방식에

서는 탐침이 시료로부터 일정거리(10nm 정도) 떨어져 있기 때문에 시료를 손상시킬 염려는 없으나 분해능이 많이 나빠진다.

그런데 탐침을 압전 구동자를 이용한 떨개로 진동시킬 경우 탐침과 시료 사이의 거리가 점차 가까워짐에 어느 일정한 거리에서는 진동의 일정 부분에서는 시료와 접촉하고 나머지 부분에서는 시료와 분리되어 있는 경우가 생기게 된다. 예를 들면 만약 탐침이 10 nm 진폭으로 진동하면 탐침과 시료 사이의 거리가 5 nm 일 때부터 탐침은 시료와 순간적으로 접촉하게 된다. 이렇게 탐침이 시료와 순간적으로 접촉하고 나머지는 비접촉 상태로 있는 방식으로 시료의 표면을 분석하는 방법을 중간 접촉 모드(두드리기 모드)라 한다. 이러한 두드리기 모드로 시료의 표면을 분석하면 접촉 모드와 유사한 정도의 분해능을 얻을 수 있고 또 탐침이 순간적으로만 접촉하기 때문에 시료 표면의 손상도 거의 없게 된다. 따라서 두드리기 모드는 접촉 방식과 비접촉 방식의 장점만을 이용하는 방식이 되는 셈이다.

두드리기 모드는 시료가 부드럽더라도 시료의 손상 없이 좋은 image를 얻을 수 있기 때문에 최근에 유기물 류의 분석에 많이 쓰이고 있다.

또 탐침 현미경이 단순히 시료의 표면을 분석하는 용도뿐만 아니라 시료의 표면을 직접 변화시켜 패턴을 제작하는 용도로 사용되는 경향이 커짐에 따라 패턴 제작에 두드리기 모드를 사용하는 방법도 많이 연구되고 있다. 탐침 현미경을 이용한 패턴 제작에는 여러 가지 방법이 있으나 많은 경우 탐침과 시료 사이에 전압을 주어 전기장이나 전류의 공급을 통해 시료의 표면을 변화시키는 방법이 많이 사용된다. 이 경우 접촉 방식을 이용하면 강한 옆힘(lateral force) 때문에 탐침의 위치가 불안정해져서 표면이 거친 시료의 경우 전하가 순간적으로 방전되어 안정적인 전기장이나 전류를 가하는 것이 힘들어진다. 이 경우 두드리기 모드를 사용하면 옆힘이 거의 없기 때문에 탐침과 시료 사이에 안정적인 전기장을 공급할 수 있고 따라서 보다 안정적인 패턴 제작이 가능하게 된다.

두드리기 모드에서는 반드시 탐침을 진동시켜 주어야 하는데 이렇게 탐침을 진동시키기 위해 사용되는 방법은 앞서서도 이야기했듯이 보통 압전 떨개를 이용하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 압전떨개 없이도 탐침을 진동시킬 수 있는 방법을 개발했다. 탐침과 시료 사이에 진동하는 전압을 주면 이 전압에 의한 전기장이 생기고 따라서 탐침은 이 전기장에 의한 힘을 받아서 진동하게 된다. 이렇게 정전기력을 진동시켜서 탐침을 진동시키는 방법으로 두드리기 모드나 비접촉 모드가 가능하다.

1 소절에서는 두드리기 모드에 대해서 간략히 설명하겠고 2 소절에서는 정전기력을 진동시키는 방법에 의한 두드리기 모드에 관해서, 3 소절에서는 미세 패턴의 제작과 두드리기 모드의 미세패턴 제작에의 적용에 관해서 설명하겠다.

1. 두드리기 모드 개요

두드리기 모드는 탐침이 시료와 순간적으로 접촉함을 통해서 생기는 탐침의 진동 진폭의 변화라든가 진동의 위상차 등의 변화를 이용하여 시료의 표면을 분석하는 것이다. 보통의 경우에는 진동 진폭의 변화를 이용한다. 탐침과 시료 사이의 거리에 따른 진동 진폭의 변화는 그림 3-1-5 과 같다. 탐침이 시료를 두드리기 시작하면서 탐침의 진동에너지가 시료와의 접촉에 의해 소모되므로 진동 진폭은 점점 작아지게 된다. 따라서 탐침과 시료의 거

리가 가까워지면 진폭은 작아지게 된다. 이러한 특성을 알게 되면 탐침의 진동의 크기와 탐침과 시료 사이의 거리 사이에는 일대일 관계가 성립된다. 따라서 탐침 진동 신호를 scanner 의 Z 값 신호로 되먹임 해 주면 탐침과 시료 사이의 거리가 일정하도록 유지하면서 scan 할 수 있게 되어 시료 표면의 morphology 정보를 얻을 수 있다.

이러한 방법으로 시료의 topography를 따라 가면서 탐침 진동의 위상변화를 측정해서 시료의 정보를 얻는 방법도 있는데 이러한 방법을 위상 모드라 한다.

그림 3-2-1 에서는 Si 기판 위에 패턴된 포토리지스트의 표면을 접촉 모드와 두드리기 모드로 본 것이다. 포토리지스트는 부드러운 물질이기 때문에 접촉 모드의 경우에는 (a)에서 볼 수 있듯이 포토리지스트의 표면이 심하게 굽는다. 그러나 두드리기 모드를 사용하면 (b)의 경우에는 전혀 굽힘이 없이 좋은 이미지를 얻을 수 있다.

2. 정전기적 진동을 이용한 두드리기 모드

탐침에 진동하는 전압 $V_{ac}\sin\omega t$ 를 주고 시료에 일정한 전압 V_{dc} 를 주면 탐침과 시료 사이에 z 방향으로 작용하는 정전기적 용량에 의한 힘은 에너지를 z 방향으로 미분해준 값이므로 아래식 3.2.1 과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} [V_{ac}\sin\omega t - V_{dc}]^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} [V_{dc}^2 - 2V_{ac}V_{dc}\sin\omega t + 0.5V_{ac}^2(1 - \cos 2\omega t)] \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

위 식에 의해 탐침은 ω 성분과 2ω 성분의 힘을 받게 되고 따라서 ω 성분과 2ω 성분으로 진동하게 된다. 이러한 진동을 비접촉 모드나 두드리기 모드로 사용할 수 있는 것이다.

그림3-2-2 는 압전 떨개(bimorph)에 AC 전압을 가해서 탐침을 진동시키는 경우와 탐침과 시료사이에 AC 전압을 가해서 탐침을 진동시키는 경우에서, 가해주는 AC 전압의 주파수와 외팔보의 진동 진폭 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 가로축은 가해주는 AC 전압의 주파수이고 세로축은 외팔보의 진동 진폭을 나타낸다.

외팔보의 공명 주파수는 대략 110kHz 정도였다. 압전 떨개에 AC 전압을 주어 탐침을 진동시킬 경우에는 진동 전압의 주파수와 같은 주파수로 압전떨개가 진동하므로 110kHz 에서 공명 특성이 나타난다. 이에 비해 정전기적 진동에 의해서 탐침을 진동시킬 경우에

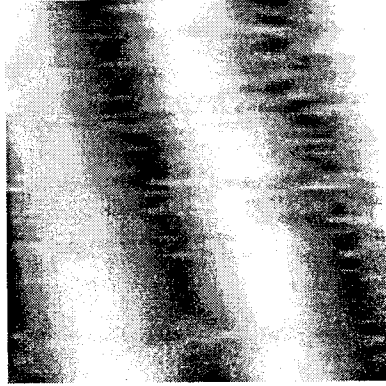


그림 3-2-1(a) 포토리지스트
표면을 접촉 모드로 본 모습

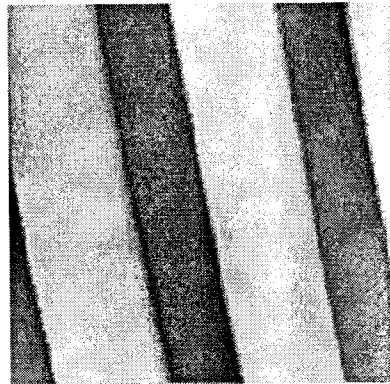


그림 3-2-1 (b)
같은 시료를 두드리기 모드로 본 모습

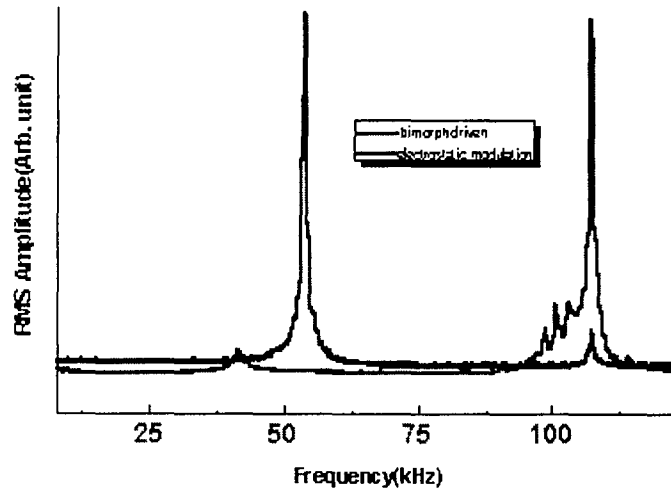


그림 15-2-2 압전 락개(bimorph)에 AC 전압을 가해서 탐침을 진동시키는 경우와 탐침과 시료사이에 AC 전압을 가해서 탐침을 진동시키는 경우에서, 가해주는 AC 전압의 주파수와 외팔보의 진동 진폭 사이의 관계를 나타낸 그래프

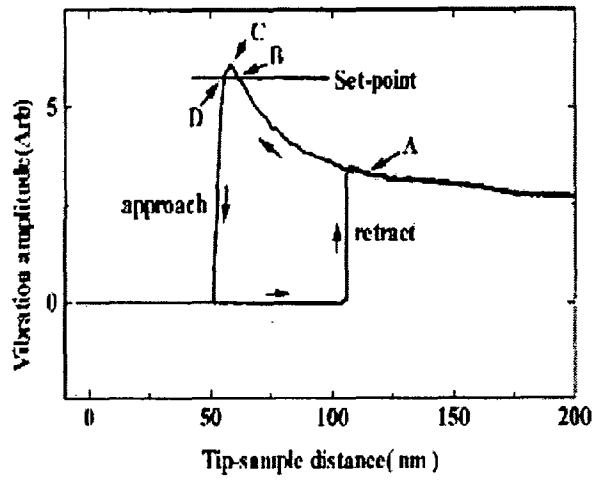


그림 3-2-3 탐침과 시료 사이의 거리에 따른 탐침의 진동 진폭(2ω 성분)의 특성

는 식 3.2.1에서 보듯이 탐침과 시료에 가해주는 AC 전압의 주파수의 2배의 주파수에서 진동이 일어나게 된다. 따라서 가해주는 전압이 55kHz 일 때 탐침은 110kHz 로 진동하게 되어 공명의 특성을 보여주게 된다.

그림 3-2-2에서 보듯이 압전 떨개에 의해서 탐침을 진동시킬 때는 압전떨개의 여러 개의 공명모드들의 영향으로 공명의 특성이 깨끗하지 못하고 여러 개의 작은 봉우리의 형태를 띤다. 이 경우 가해주는 AC 전압의 주파수가 작은 봉우리 영역에 걸치게 되면 탐침과 시료 사이의 거리를 일정하게 유지해 주기 위한 되먹임의 방향이 바뀔 수 있으므로 되먹임이 불안정해진다.

그러나 정전기적 진동에 의해 탐침을 진동시키는 경우 진동 모드가 오로지 외팔보의 진동모드 뿐이기 때문에 공명의 특성이 깨끗하고 Q 값이 매우 크다. 따라서 되먹임이 안정적이고 다른 진동 모드에 의한 노이즈가 없게된다.

그림 3-2-3 은 탐침과 시료 사이의 거리에 따른 탐침의 진동 진폭(2ω 성분)의 특성을 나타내는 그림이다. 그림 3-1-5 의 압전 떨개에 의해서 진동하는 경우와는 다르게 탐침이 시료에 접근함에 따라 진동 진폭이 커진다. 이는 탐침과 시료 사이의 거리가 작아짐에 따라 정전용량이 커져서 $\frac{dC}{dz}$ 값이 증가해서 생기는 것이다.

정전기적 진동에 의한 두드리기 모드에서는 그림 3-2-3 의 B와 D영역 사이에서 되먹임의 방향이 바뀌므로 안정적인 되먹임 조건을 얻기 위해서는 D 보다 작은 거리에서 해야 함을 알 수 있다.

그림 3-2-4는 정전기적 진동에 의한 두드리기 모드로 시료를 본 것이다 (a)에서는 100nm 직경의 폴리스티렌 구를 (b)에서는 1 μm 에들이발을 시료로 사용했다.

사용한 외팔보는 스프링 상수가 1.6 N/m 이었고 공명 주파수가 180 kHz 이었다. 가해진 탐침과 시료 사이의 AC 전압은 진폭이 10V, 주파수가 90 kHz 였다.

정전기적 진동에 의한 두드리기 모드는 압전 떨개가 없이도 작동할 수 있기 때문에 쉽게 제작될 수 있으며 또 공명 특성이 좋기 때문에 노이즈 없이 좋은 이미지를 얻을 수 있는 것이 특징이다.

3. 미세 패턴 제작과 두드리기 모드

(1) 미세패턴 제작

접촉 모드에서는 탐침과 시료 사이의 거리가 1 nm 정도이기 때문에 수 V 의 전압만 가해도 탐침과 시료 사이의 전기장이 수 V/nm 이나 된다. 이 전기장은 매우 강하므로 보통의 환경에서 시료의 표면에 묻어있는 습기를 어느 정도 이온화시킬 수 있을 정도이다. 따라서 이 정도의 전기장에서의 시료의 표면에 붙어있는 물분자는 전해질로 작용하게 된다. 그림 3-2-5(a)에서 보듯이 탐침과 시료를 전극으로 사용하여 탐침에 (-)극, 시료에 (+)극을 가하고, 물분자를 전해질로 이용하면 이온화된 물분자의 OH⁻ 가 양극의 전극에 달라붙기 때문에 시료에 산화막이 형성된다. 이러한 산화막은 대부분 부도체이므로 시료가 금속이라면 이

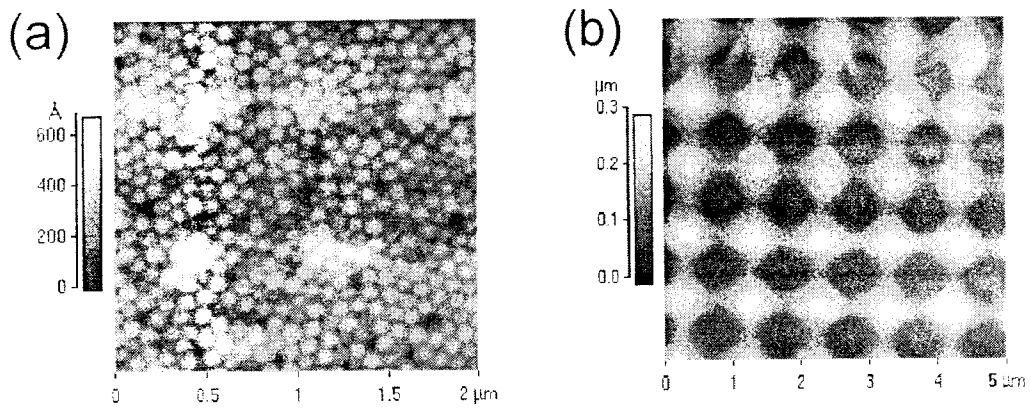


그림 3-2-4 정전기적 진동에 의한 두드리기 모드로 시료를 본 것이다 (a)에서는 100nm 직경의 폴리스티렌 구를 (b)에서는 1 μm 에돌이발을 시료로 사용했다. 사용한 외팔보는 스프링 상수가 1.6 N/m 이었고 공명 주파수가 180 kHz 이었다. 가해진 탐침과 시료 사이의 AC 전압은 진폭이 10V, 주파수가 90 kHz 이었다.

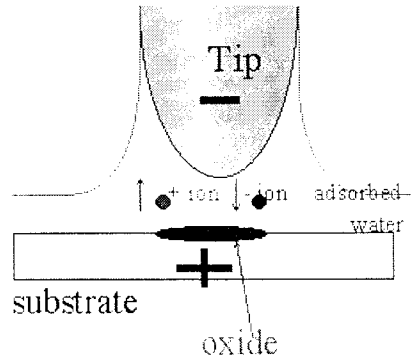


그림 3-3-1 탐침과 시료를 전극으로 사용하여 탐침에 (-)극, 시료에 (+)극을 가하고, 물분자를 전해질로 이용하면 이온화된 물분자의 OH^- 가 양극의 전극에 달라붙기 때문에 시료에 산화막이 형성된다.

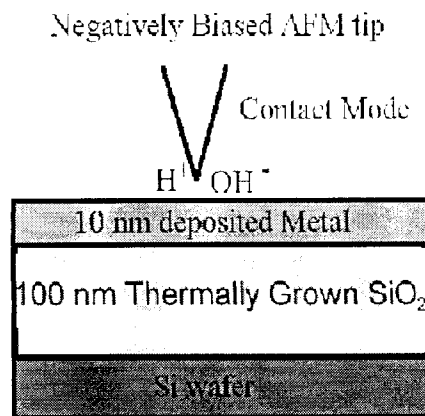


그림 3-2-5(b) 미세패턴의 제작을 위한 시료의 준비

러한 방법에 의해 부도체의 패턴을 만들 수 있으므로 소자를 제작하는데 아주 편리하게 응용될 수 있다. 또 패턴된 산화막의 크기는 대체로 탐침의 직경 정도이므로 극미세 소자의 제작에 이용될 수 있다.

또 다른 미세패턴 제작의 방법으로는 탐침으로 직접 부드러운 물질을 긁는 방법이 있다. 이 경우에는 외팔보를 훨씬 단단한 것을 사용해야 한다. 보통의 경우 접촉모드에서는 0.1 N/m 정도의 스프링 상수를 갖는 외팔보를 쓰지만 긁는 방법에 의한 패턴 제작에 사용되는 외팔보는 보통 수십 N/m 정도의 스프링 상수를 갖는다. 이 경우 패턴된 모양을 보기 위해 접촉모드를 사용하면 시료의 표면이 다시 긁히기 때문에 접촉모드를 사용하면 안된다. 따라서 패턴을 제작하기 위해서 긁을 때는 접촉 모드로 패턴된 표면을 볼 때는 두드리기 모드로 해야한다.

다음절에서는 Ti 과 Si 표면에 탐침으로 전기장을 가해서 산화피막을 만드는 방법에 의해서 미세 패턴을 제작하는 방법에 대한 결과와 이 방법에 의해 만들어진 접합의 특성에 대해서 설명하겠다. 그 다음절에서는 포토 리지스트를 탐침으로 긁는 방법에 의해서 미세패턴을 제작하는 방법에 대한 연구 결과에 대해 설명하겠다.

(2) 미세 산화피막에 의한 미세패턴의 제작

그림 3-2-5(b) 에 시료의 준비 과정을 나타냈다. Si wafer에 100 nm 정도의 열산화막을 키우고 그 위에 스퍼터로 10 nm 정도의 Ti을 입혔다. Ti은 탐침과 시료 사이에 가해주는 전압에 의해서 미세 산화피막이 잘 형성됨이 알려져 있다.

그림 3-2-6 은 Ti 표면에 10V 전압을 가하여 직사각형으로 산화시키면서 가운데 부분만 60 nm 의 폭으로 남겨둔 패턴의 이미지이다. 이러한 패턴은 수 십 nm 정도 되는 좁은 선폭의 도체선을 만들 때 쓰일 수 있는 패턴이다. 이렇게 좁은 선폭의 도체 선을 만들 수 있으면 도체선의 중간 부분에 두 개의 산화막을 성장시켜 M(Metal)-I(Insulator)-M-I-M 형태의 접합소자를 만들 수 있고 여기에 gate 전극만 추가하면 단전자 트랜지스터를 만들 수 있다.

그림 3-2-7는 이러한 방법을 실제로 좁은 선폭의 접합 소자에 응용하기 위한 시도이다. 우선 그림 3-2-5(b)에서 처럼 준비된 Ti 박막을 사진작업 후 Buffered HF 로 Ti을 식각해서 6 μm 선폭의 Ti 선으로 만들었다. 그 위에 탐침으로 전압을 가해서 산화피막을 성장시켜 패턴을 만들었다. 이 경우 미세선폭의 접합소자가 되려면 성장한 산화막이 Ti 박막의 밑바닥까지 파고 들어가 탐침으로 산화시킨 부분은 완전히 부도체가 되도록 해야한다.

그림 3-2-7에서 보듯이 실제로 제작된 접합 소자의 경우 산화막이 미세하게 성장하지 못하고 500 nm 정도 크기의 알갱이 형태로 성장하여 미세한 선폭의 소자를 제작하지는 못하였다. 이는 사진작업과 식각작업으로 Ti 박막의 표면에 유기물들이 붙어서 안정적인 산화막의 성장을 방해한 것으로 생각된다. 또 접촉모드에서는 강한 옆힘 때문에 외팔보가 불안정해서 시료가 조금만 거칠어도 탐침과 시료사이에 순간적인 방전이 일어나 큰 덩어리 형태의 산화막을 성장시키곤 했다. 어쨌든 600 nm 선폭의 Ti 선을 제작하였고 중간부분을 역시 산화피막 성장 방법으로 산화시켜 MIM 접합을 만들었다. 그리고 그 특성을 조사하였

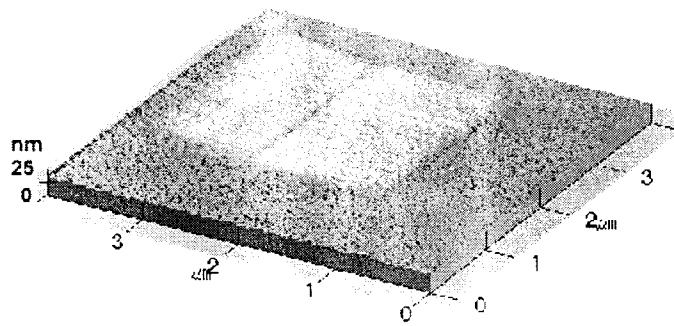


그림 3-2-6 Ti 표면에 10V 전압을 가하여 직사각형으로 산화시키면서 가운데 부분만 60 nm 의 폭으로 남겨둔 패턴의 이미지

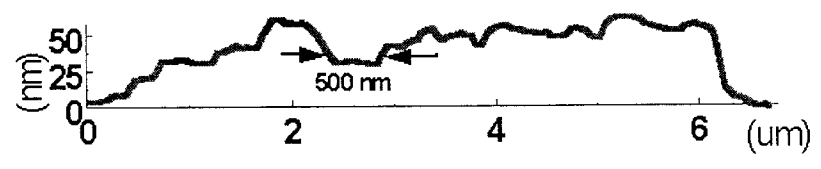
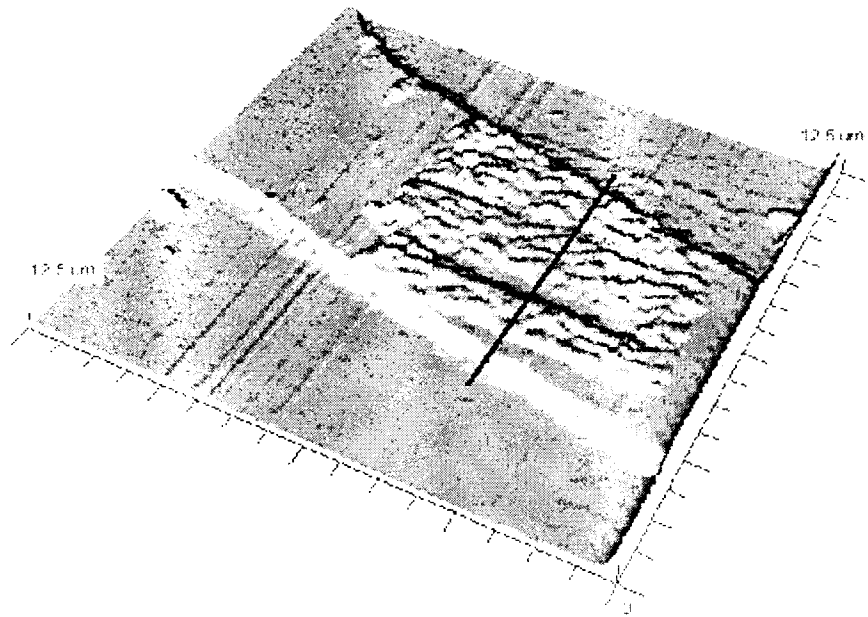


그림 3-2-7 6 μm 선폭의 Ti 선 위에 탐침으로 전압을 가해서 산화피막을 성장시켜 패턴을 제작. MIM 접합이 만들어졌다.

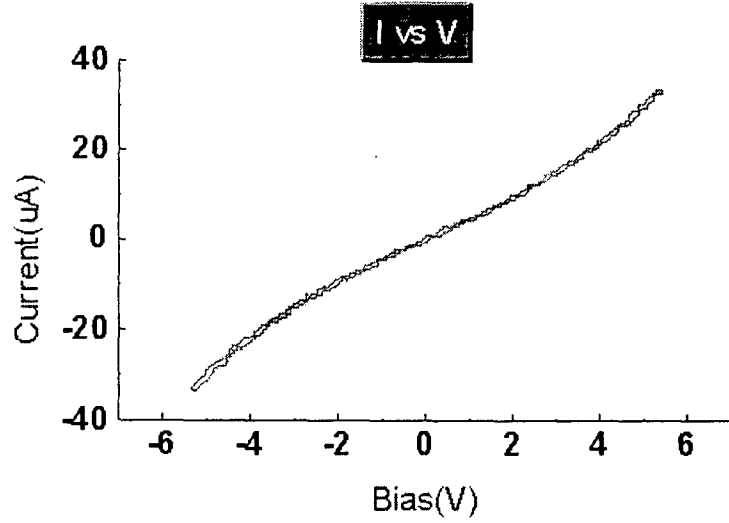


그림 3-2-8(a) 그림 3-2-7에서 제작된 MIM 접합의 I-V 특성

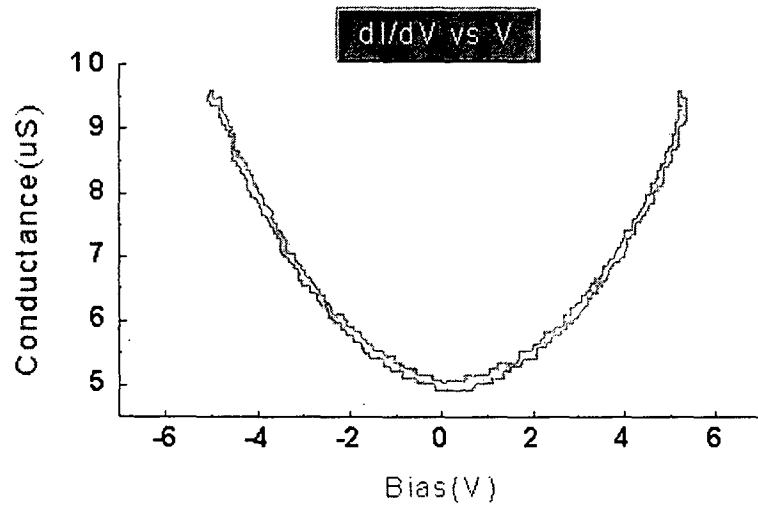


그림 3-2-8(b) 그림 3-2-7에서 제작된 MIM 접합의 $dI/dV - V$ 특성

는데 그림 3-2-8은 제작된 MIM 접합의 I-V 와 $dI/dV - V$ 의 특성곡선이다. 얻어진 I-V 곡선을 MIM 접합의 이론치에 맞추어본 결과 에너지 장벽의 크기가 178 meV 가 나왔고 이는 외국의 다른 연구소에서 실험한 결과와 일치하는 것이다.

비록 산화막이 안정적으로 미세하게 성장하지 못하여 미세접합의 제작과 단전자 트랜지스터의 제작은 불가능했지만 산화피막 성장 방법으로 금속선을 제작할 수 있고 또 산화피막을 터널 장벽으로 사용할 수 있다는 것이 확인되었다. 그러나 이렇게 탐침으로 전압을 가하여 산화막을 성장시키는 방법은 위에서 이야기했듯이 매우 불안정하고 또 박막의 두께가 매우 얇아야 한다는 단점이 있다. 또 산화가 잘 되고 산화막 조직이 치밀한 물질들 (Al, Ti, Cr, Si, GaAs)에만 적용될 수 있기 때문에 다양한 물질에 적용될 수 없다는 것이 단점이다. 그리고 보통 Si 탐침을 사용하는데 Si 탐침의 경우 탐침 끝에 자연 산화막이 성장하기 때문에 이 산화막이 안정적인 산화막의 성장을 방해한다. 금속을 입힌 탐침이 금속을 입히지 않은 Si 탐침보다 산화막의 성장에 훨씬 더 안정적이었다.

3-2 두드리기 모드에 의한 패턴제작

산화막을 접촉모드에서 성장시키면 강한 옆힘 때문에 외팔보가 불안정하여 갑작스러운 방전이 일어나곤 했는데 이를 해결해 보기 위해 두드리기 모드로 패턴 제작을 시도해 보았다. 그림 3-2-9(a)는 두드리기 모드를 사용하여 각각 15, 12.5, 10V 의 전압을 Si 표면에 가해 산화막을 성장시킨 이미지이다. 최소 선폭은 그림 3-2-9(b)에서 보듯이 20 nm 정도까지 가능했다. 접촉모드에 비해서 두드리기 모드에 의한 패턴제작은 좀더 안정적이었으나 탐침과 시료 사이의 전기장이 상대적으로 약해서 산화막이 깊게 성장하지 못했다. 그래서 두드리기 모드로는 산화막이 Ti 박막의 바닥까지 뚫지 못해서 접합소자를 제작하지 못하였다.

3-3. 탐침으로 긁는 방법에 의한 패턴제작

13 N/m 의 스프링 상수를 지닌 단단한 탐침으로 포토 리지스트의 표면을 긁어내어 패턴을 제작하였다. 그리고 패턴된 리지스트를 보는데는 두드리기 모드를 사용하였다.

그림 3-2-10 에는 탐침으로 긁어서 패턴하는 방법이 설명되어 있다. 우선 시료에 포토 리지스트를 얇게 입혀야 한다. 여기서 포토리지스트를 너무 두껍게 입히면 나중에 탐침으로 긁어내기가 힘들게 된다. 100 nm에서 300 nm 정도로 포토 리지스트를 입히면 사진작업도 가능하고 또 탐침으로 긁어내는 과정도 잘 되기 때문에 넓은 영역의 패턴은 사진작업으로, 미세한 패턴은 탐침으로 긁는 방법으로 할 수 있었다. 이런 식으로 영역에 맞는 패턴 제작법을 병용할 수 있었다. 리지스트를 얇게 입히기 위해서는 포토리지스트(Az 1512)에 thinner(Az 1500)를 첨가했다. 그리고 그 두께는 Nanospec 이나 ellipsometer를 이용하여 측정하였다. (a)에서 처럼 준비된 시료를 사진작업하여 (b)의 패턴을 만들었다. (b)의 사진은 CCD 로 확대된 패턴의 모양을 찍은 것이다. 밝은 부분은 리지스트가 입혀진 부분이고 어두운 부분은 리지스트가 develop 과정에 의해 날라가서 밑에 있는 SiO_2 가 드러난 것이다. 미세 패턴을 제작할 부분에 가서 (c) 과정에서처럼 단단한 탐침으로 리지스트를 긁어낸다. 이때 리지스트가 두꺼우면 (300 nm 정도) 한번의 scan 으로 리지스트가 모두 긁히지는 않기 때문에 여러 번 긁어내야 한다. 그림 3-2-11 에 scan 하는 도중에 측정되는 Z 값을 나타냈다. 처음 scan 에서는 리지스트가 완전히 벗겨지지 않아서 남아 있지만 4번째

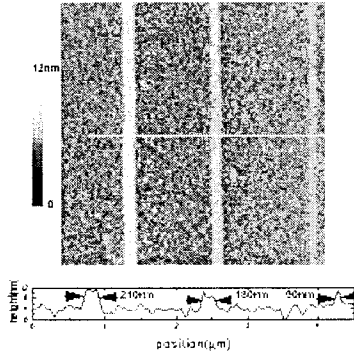


그림 3-2-9(a) 두드리기 모드를 사용하여 각각 15, 12.5, 10V 의 전압을 Si 표면에 가해 산화막을 성장시킨 이미지

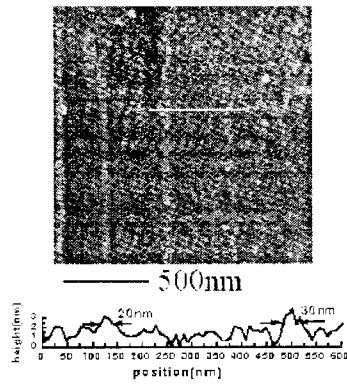
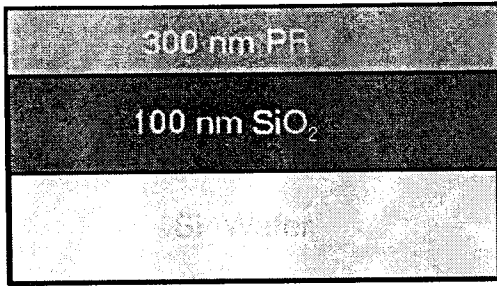
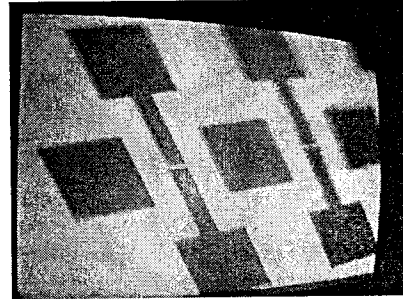


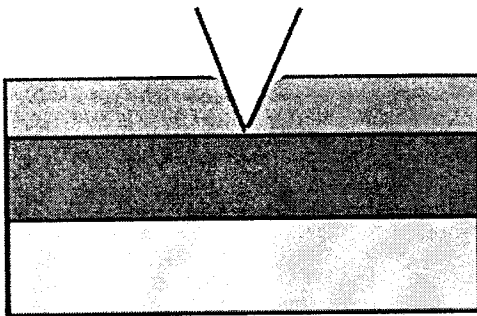
그림 3-2-9(b) 두드리기 모드에 의해서 20 nm 정도의 패턴을 제작하는 것이 가능했다.



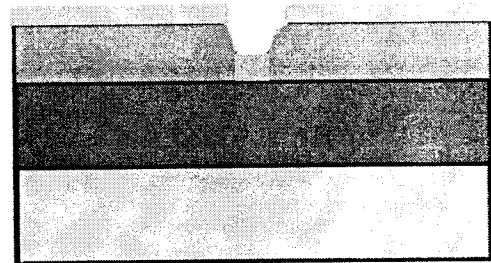
(a)



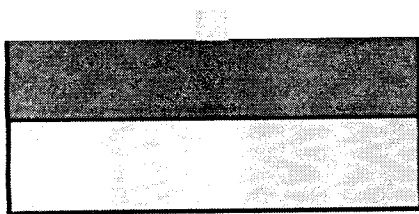
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 3-2-10 큰 size 는 사진 작업으로, 작은 size 는 탐침으로 리지스트를 긁어 내어 미세 패턴을 제작하는 방법

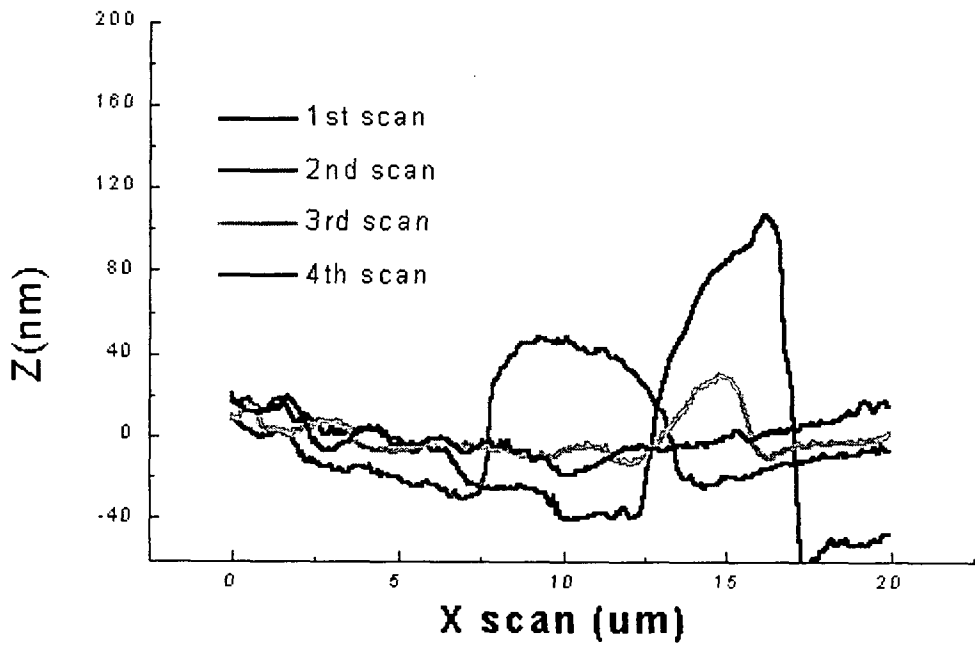


그림 3-2-11 Scan 하는 도중에 측정되는 Z 값. 처음 scan 에서는 리지스트가 완전히 벗겨지지 않아서 남아 있지만 4번째 scan 에서는 완전히 벗겨졌음을 확인할 수 있다.

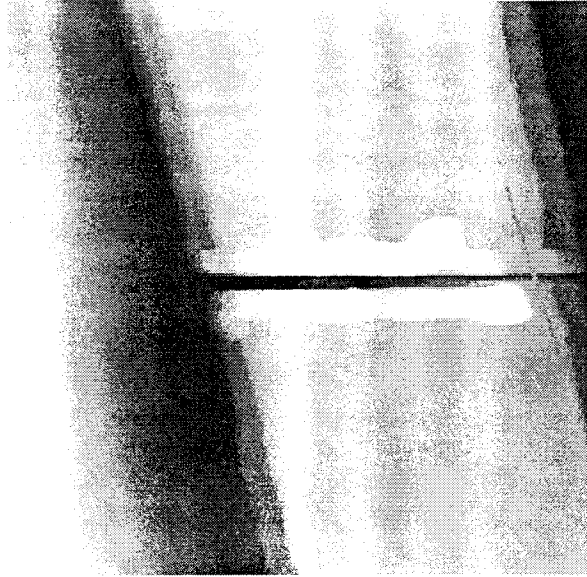


그림 3-2-12 (a) 사진작업으로 패턴된 선을
탐침으로 긁어낸 모습

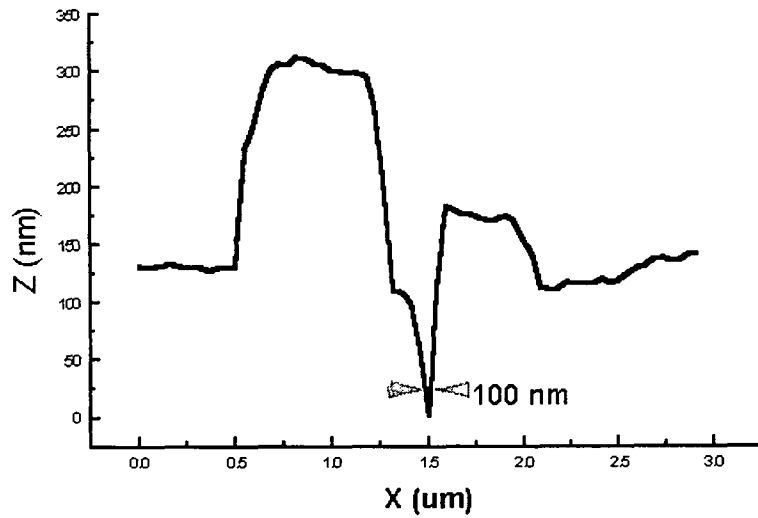


그림 3-2-12(b) 탐침으로 긁어낸 부분의 높이 분포.
선폭 100 nm 정도로 파였음이 확인된다.

scan 에서는 모두 제거되었음을 확인할 수 있다. 탐침으로 가한 힘은 $5 \mu N$ 이었다.

여기서 남아 있는 리지스트의 위치가 scan 방향에 따라 변하는 것처럼 보이는 것은 PZT scanner 의 히스테리시스 때문이다. 이런 식으로 남아 있는 리지스트를 보면서 긁어 낼 수 있기 때문에 패턴 제작의 오차를 줄일 수 있다. 그림 3-2-12 의 (a)는 탐침으로 완전히 긁어낸 리지스트를 같은 탐침으로 두드리기 모드를 사용하여 본 것이다. 두드리기 모드는 시료와 순간적으로만 접촉하기 때문에 시료에 손상을 전혀 주지 않아 이미지 도중에 리지스트가 긁히는 일이 전혀 없었다. 그림 3-2-12의 (b)는 긁혀진 선의 폭을 본 것인데 100 nm 정도로 탐침의 지름 정도로 긁혔음을 확인할 수 있었다.

이러한 방법을 이용하여 Lift Off 공정을 사용하면 선폭 100 nm 이하의 금속선을 만들 수 있다. 그 방법이 그림 3-2-10 의 (d)와 (e)에 나타나 있다. (d)에서처럼 Al 이나 Au 등의 금속을 20 nm 정도 입힌 후 아세톤으로 리지스트를 녹여 내면 리지스트 위의 금속은 리지스트와 함께 들떠서 날아가고 그림 (e)에서처럼 SiO_2 위의 금속만 남게 되어 부도체 위에 100 nm 이하의 금속선이 만들어지게 된다.

이 방법은 사진작업에 의한 큰 패턴의 제작과 탐침으로 긁는 방법에 의한 미세패턴의 제작을 함께 병용할 수 있다는 장점이 있으므로 소자 제작에 큰 도움이 되리라 본다.

제 3 절 전기힘현미경을 이용한 전위측정법

1. 서론

오늘날 반도체 소자 회로의 집적도와 동작 속도가 날로 증가되어 가면서 고전적인 회로 분석 도구는 이미 그 한계점에 도달해 있다. 집적회로의 내부 연결선상에서 신호를 측정하는 기술은 집적회로의 디자인과 테스트에 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서 동작 중에 있는 소자에 대해 소자의 내부 연결선상에서 전압을 측정하고 테스트할 수 있는 장비가 요구되어지고 있다. 지금까지 재래적인 접촉방식- 가령, 텅스텐 탐침을 이용한 접촉방식은 전압 측정시 동작 중에 있는 소자의 신호에 변형을 줄 뿐만 아니라, 공간적 분해능이 텅스텐 탐침의 크기에 제한된다. -의 테스트의 대안으로 비접촉, 비파괴적인 방법이 개발되었지만 시간 및 공간적인 분해능의 요구를 동시에 해결하지는 못한다. 예를 들어 전광학적 분석 방법 (electro-optic probing)은 상당한 시간적 분해능을 제공해 주지만, 공간적 분해능은 광학적 파장에 제한이 될 뿐만 아니라 인접한 연결선의 전압의 영향에 상당히 민감하다. 한편으로 전자선 분석 방법(electron-beam probing)은 시간적으로나 공간적으로 상당한 분해능을 갖고 있다. 하지만 진공에서 작동되어야만 한다는 것과 소자 상층부의 산화 보호막(passivation layer)을 제거하여야만 측정이 가능하다는 점과 그리고 교류 전압만이 측정될 수 있다는 것이 큰 단점이다. 따라서 진공에서

작동하면 장비가 복잡해지고 측정에 필요한 시간이 많이 요구된다. 또한 측정하고자 하는 위치에 미리 보호막이나 부도체 층을 제거해야하는 번거로움이 수반된다. 이러한 단점을 해결할 수 있는 방법이 최근에 발명되었으며, 현재까지 그 기술이 상당히 진전되었다.

2. 전기힘현미경의 도입

주사형탐침현미경(scanning probe microscope, SPM)은 공간적인 분해능을 나노미터($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 수준으로 증가시킬 수 있는 비파괴적 검사의 상징으로 여겨온지 오래되었다. SPM은 검출하려는 물리량과 작동 모드에 따라서 많은 변형된 형태를 띠고 있는데, 이번 연구에서 사용된 것은 전기힘현미경(electrostatic force microscope, EFM)이다. 기존 원자힘현미경(atomic force microscope, AFM)의 장치에 전압을 인가함으로써 시료와 탐침 사이의 전기적 상호작용을 이용하여 시료 표면의 전기적 성질에 대한 정보를 읽어 낸다. 이 경우 작은 탐침으로 비접촉 방식(noncontact mode)으로 전압을 측정하기 때문에 소자내의 전압에는 전혀 영향을 주지 않음으로서 원래의 신호를 충실히 읽어낼 수 있다. 비접촉 모드에서 작동중인 EFM의 전도성이 있는 탐침(conductive cantilever)에 전압을 인가하면 탐침과 시료 사이의 전압 차에 의해 탐침은 정전기적 힘(electrostatic force)을 받게 된다. 정전기적 힘은 전압의 제곱에 비례하기 때문에 혼합항(mixing term)을 만들어 내게 되며, 이들 혼합항의 정보는 위상맞춤증폭기(phase-sensitive detector, Lock-in amplifier)에서 분리해 낼 수 있다. 최종적으로 탐침이 받는 정전기적 힘(electrostatic force)을 EFM으로 감지함으로써 시료 내부의 국부적인 전압의 시간적 변화를 알아낼 수 있다. 또한 탐침에 가해진 펄스 전압의 특성에 따라서 시간적 측정 범위와 분해능이 결정되기 때문에 좋은 펄스 발진기(pulse generator)만 있으면 초고속 소자의 전압 측정이 가능하다. 현재까지 스탠포드 대학의 연구 그룹에 의해서 수십 GHz까지 측정이 되어있다. 여기에도 두 가지 측정 형태가 있는데, 우선 정전위 측정법(scanning potentiometry)이 시료 표면의 정전위(static potential)를 측정하기 위한 도구라면, 전위 측정법(voltage probe)은 소자의 한 점에서 시간에 따라 빠르게 변화하는 신호를 직접 측정하는 장치라고 할 수 있다. 따라서 전위 측정법은 시간적으로 넓은 대역폭(bandwidth)을 가지고 있다. 다음 표 3.3.1은 전자선 분석법(e-beam probe)와 EFM을 이용한 전위 측정법을 비교 분석한 결과이다

3. 전위 측정법의 작동 원리 및 연구 결과

EFM이 비접촉 모드에서 작동할 때 탐침과 시료 사이에 인가된 전압에 의해 정전기적 힘(electrostatic force)이 작용한다. 이러한 시스템을 면적 A , 탐침과 시료 사이 거리 z 를 갖는 평행판 축전지로 아래 그림 3.3.1과 같이 모델화할 수 있다.

기준	E-Beam Probe	EFM Voltage Probe
작동 환경	진공	공기중, 진공
DC 전압 측정	불가능	가능
voltage sensitivity	50mV-100mV	1- 10mV
공간적 분해능	0.1 μ m	0.05 μ m
시간 분해능	50-150ps	5ps
산화 보호막 위에서 측정	불가능	가능

표 3.3.1. 전자선 분석법(e-beam probe)과 EFM을 이용한 전위 측정법(voltage probe)의 비교

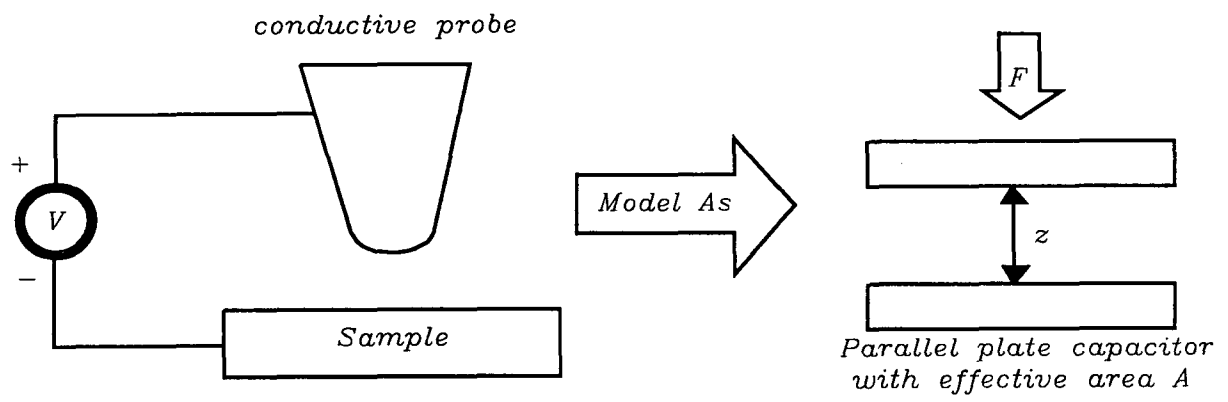


그림 3.3.1. 탐침과 시료 시스템을 평행판 축전지로 모델화

탐침과 시료 사이의 거리가 10~100 nm 정도 가까워지면 두 전극의 전압의 제공에 비례하는 전기용량 인력(capacitive attractive force)이 탐침에 가해진다. 따라서 탐침과 시료 사이의 전압의 변화에 따라서 탐침은 역학적인 힘으로 반응을 하게 된다. 보통의 탐침(cantilever)의 역학적인 공명 주파수는 수십 또는 수백 kHz에 제한되기 때문에 발생한 정전기적 힘 중 저주파 성분만 역학적 진동에 영향을 주고 고주파 성분은 제거되어 진다. 따라서 탐침 자체가 저역 통과 필터(lowpass filter) 역할을 하게 된다. 이러한 역학적인 성질과 정전기적 힘이 전압의 제공에 의존한다는 비선형 현상은 고주파 전압 추출에 중요한 역할을 담당하게 된다. 고주파 추출 원리를 기술하기 위해서 시료의 주기적인 파형을 V_{samp} , 탐침에 가해진 주기적인 전압을 V_{probe} 라고 하자. 그러면 탐침이 받는 정전기적 힘은 다음과 같이 주어진다.

$$F = \frac{\epsilon A}{2z^2} (V_{samp} - V_{probe})^2 \quad \text{-----}(3.3.1)$$

$$F = \frac{\epsilon A}{2z^2} (V_{samp}^2 - 2V_{samp} V_{probe} + V_{probe}^2) \quad \text{-----}(3.3.2)$$

식 (3.3.2)의 두 번째 항은 V_{samp} 와 V_{probe} 를 혼합하는 것을 보여주고 있다. 이 항으로부터 발생한 힘은 두 신호의 진동수의 합과 차의 진동수 성분을 만들게 된다. 합의 진동수 성분은 고주파이므로 탐침의 역학적 성질에 의해 제거되어지고 차의 성분만 반응하게 된다. 따라서 탐침과 시료에 가해진 전압 신호가 고주파일지라도 저주파 중간파로 낮추어 탐침의 응답을 발생시킬 수 있다. 즉 전위 측정법은 EFM을 고주파 혼합기로 작동시켜서 두 개의 고주파 신호(샘플링 펄스와 소자의 전기 신호)들 입력으로 하여 저주파 신호를 출력하게 하는 장치로 설명될 수 있다. 이러한 기술을 약간 진보시켜서 디지털 오실로스코프가 샘플링 하듯이 샘플링 펄스를 연속적으로 인가함으로써 동일한 현상을 일으킬 수 있다.

그림 3.3.2는 고주파 EFM 전위 측정법의 개략도 이다. 개략도에 대해 부연 설명하면, 여기에는 부가적인 혼합기(mixer)가 사용되고 있는데, 샘플링된 전압을 위상 맞춤증폭기(lock-in amplifier)으로 측정하기 위하여 저주파 진폭 변조 신호를 사용하게 된다. V_s 는 V_{DUT} (테스트 중인 소자의 국부 전압) 샘플링을 하기 위한 매우 좁은 폭을 갖는 펄스 신호이다. 따라서 1차 혼합기에서 V_m 과 V_s 를 곱해진 신호(V_p ; 수식-5)가 탐침에 가해지게 된다. EFM은 2차 혼합기로서 V_p 와 V_{DUT} 를 비선형 혼합한다. 그러면 탐침이 받는 순간적 정전기적 힘이 수식 (3.3.6)과 같고, 평균적인 힘은 수식 (3.3.7)과 같이 나타난다. 여기서 τ 는 펄스의 지연 시간이며, $T = 1/2\pi\omega_0$ 는 저주파 변조 주기이다.

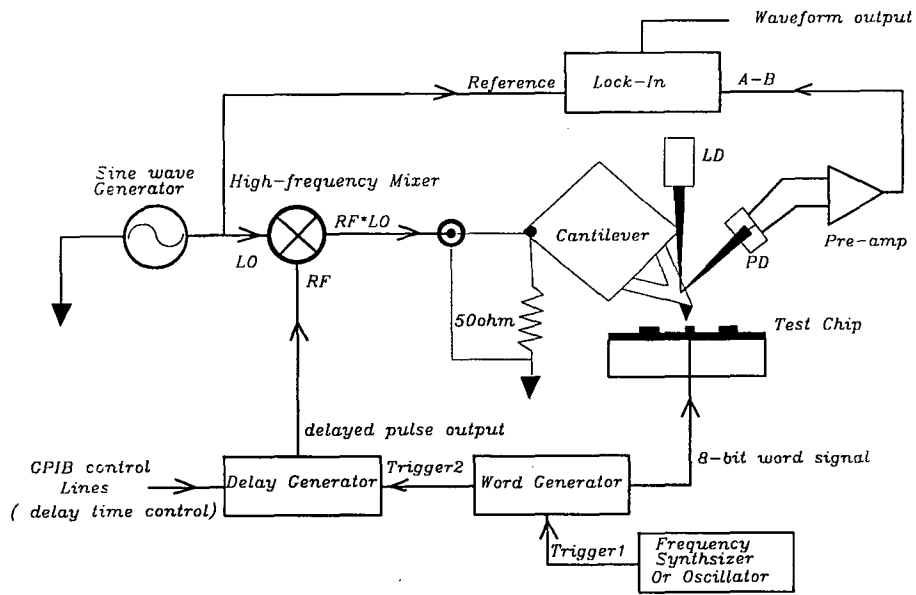


그림 3.3.2. 고주파 전압 측정을 위한 전위 측정법의 개략도

$$V_m(t) = V_0 \cos \omega_0 t \quad \text{-----}(3.3.3)$$

$$V_s = G\delta(t-\tau) \quad \text{-----}(3.3.4)$$

$$V_p = V_m \times V_s = V_0 G\delta(t-\tau) \cos \omega_0 t \quad \text{-----}(3.3.5)$$

$$F \propto \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} (V_p + V_{DUT})^2 \quad \text{-----}(3.3.6)$$

$$F_{avg} \propto \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} \left\{ \frac{1}{2} V_0^2 \left(\frac{\delta}{T}\right)^2 + V_{DUT}^2 + 2V_0 \left(\frac{\delta}{T}\right) V_{DUT} \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} V_0^2 \left(\frac{\delta}{T}\right)^2 \cos 2\omega_0 t \right\}$$

----- (3.3.7)

결국 탐침은 평균적 힘에 응답하게 된다. 따라서 수식 (3.3.7)에서 세 번째 항은 순전히 가해진 저주파 변조 신호의 진폭과 소자의 국부 전압에만 의존한다. Lock-in으로 이 성분을 추출한다면 빠르게 변화하는 소자내의 전압 신호를 느린 시간 주기로 관측할 수 있다. 그림 3.3.3은 워드 발진기(word generator)와 지연 발진기(delay generator)의 트리거 신호와 출력 신호에 대한 시간도(timing diagram)를 나타낸다. 지연된 펄스(delayed pulse output)가 주어진 시간 동안 연속 인가를 마치면 측정된 한 주기의 파형을 얻을 수 있다. 그림4는 50 MHz의 클럭(clock)에 의해서 만들어진 8-bit 신호를 EFM 전위 측정법으로서 추출한 결과로서 원래의 신호와 비교해 볼 때 거의 일치한다. 그림 3.3.4에서 위의 신호는 작동중인 집적 회로(IC) 소자 위에서 EFM 전위 측정법에 의해 측정된 데이터이고 아래쪽 신호는 입력 신호를(소자의 입력측의 신호) 상용의 디지털 오실로스코프로 읽은 전압 신호이다. 두 신호를 비교해 보면 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 전위 측정법에 의해 샘플링된 신호에 약간의 변형이 보이지만 이것은 실제 신호 모양으로서, 신호가 소자 내부의 얇은 배선을 통해 흘러갈 때 외적인 요인에 의해 변형된 것이다.

4. 정전위 측정법의 연구

정전위 측정법(scanning potentiometry)에 관한 연구의 목적은 원자힘현미경(atomic force microscope)가 제공하는 공간적인 고분해능을 이용함으로써 매우 작은 이성 반도체 접합- 가령, pn junction -을 따라 소자 보다 작은 크기에서 국소 전위 분포와 결함(defect)을 조사하는데 목적이 있다. 현재까지 정전위 측정법(scanning potentiometry)에 관한 연구 진행은, PSI사(Park Scientific Instruments)와 협력을 통하여 전위 되먹임(potential feedback) 없이 정전위 상(static potential image)을 얻는데 까지 성공하였다. 탐침과 반도체 시료 사이에

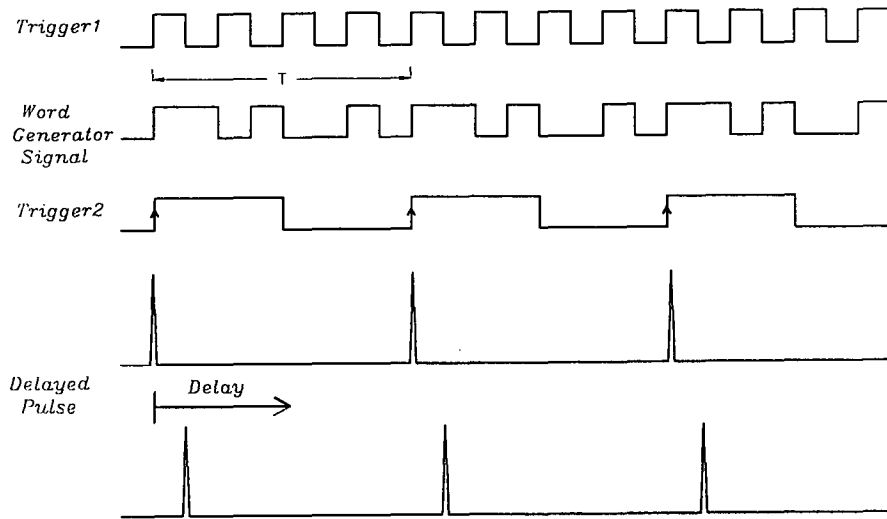


그림3.3.3. delay generator와 word generator의 신호들에 대한 타이밍도

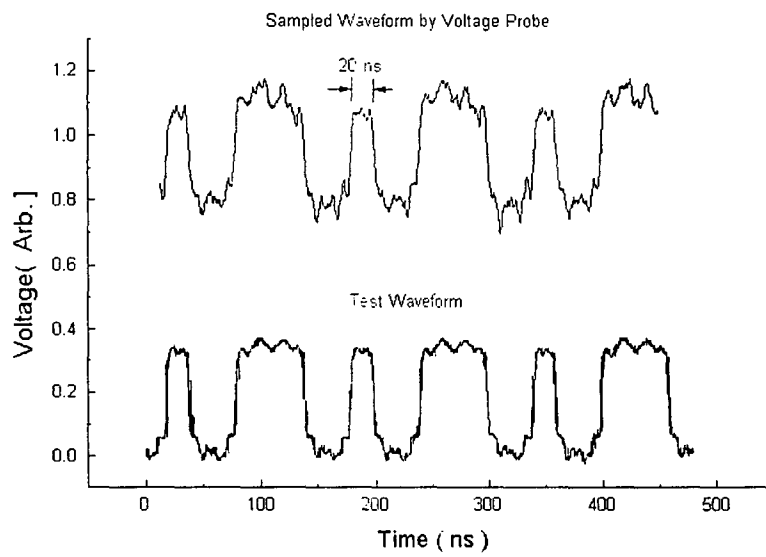


그림 3.3.4. 디지털 오실로스코프에 의해 측정된 실제 파형과 전위 측정법에 의해 샘플링된 데이터의 비교

전기장을 인가함으로써 발생하는 정전기적 힘(electrostatic force)을 실리콘 외팔보(Si-cantilever)로서 측정함으로써 시료의 전기적 특성, 예를 들면, 정전위(static electrical potential), 이차원적 전하 밀도 분포(2-dimensional carrier concentration profile), 결함(defect), 공간 전하 분포(space charge distribution) 그리고 DRAM의 도랑 축전기(trench capacitor) 형성 모양 등을 조사할 수 있다. 이러한 전기적인 성질을 조사하는 동안 탐침과 시료 사이의 거리는 일정하게 유지되어야 하므로 높낮이 되먹임 회로(topography feedback loop)가 필요하다. 높낮이 되먹임은 우리 연구 그룹에서 개발한 정전기적 태핑 모드(electrostatic tapping mode)로서 제어한다. 본 연구 기간 동안 주요 연구 성과는 정전기적 힘 하에서 탐침과 시료의 상호 작용에 관한 근본적인 현상 이해와 정전기적 태핑 모드의 개발이다. [Hong 1996]

가. 정전기장하에서 탐침과 시료 사이의 상호작용 연구

본 연구 과정에서 정전기적 힘 변조법(electrostatic force modulation)을 이용하여 탐침과 시료 사이의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 위에서 이미 살펴본 바와 같이, 실리콘 외팔보(Si-cantilever)와 시료 사이에 전압을 인가하면 정전기적 힘이 유도된다. 유도된 전기용량 전기력(capacitive electric force)에는 시료 표면의 높낮이(topography)에 관한 정보 뿐만 아니라 전기적 성질에 관한 정보도 포함되어 있다. 이처럼 혼합된 상호 작용으로부터 높낮이 정보와 전기적인 정보를 분리함으로써 보다 정확한 전기적 특성 분석을 하였다. 탐침에 교류 전압을 인가하였을 때 유도된 전기용량 힘(capacitive force)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 V_{probe} &= V_{ac} \sin \omega t \\
 F &= -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_{probe} - V_{samp})^2 \\
 &= -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} \left\{ V_{samp}^2 + 2V_{samp} V_{ac} \sin \omega t + \frac{1}{2} V_{ac} (1 + \sin 2\omega t) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.3.8}$$

탐침에 진동수가 ω 인 전압을 인가할 때 탐침은 ω 와 2ω 로 진동하는 힘을 받게 된다. 수식 (3.3.8)에서 나타난 것과 같이 전기용량 힘(capacitive force)은 탐침과 시료 사이의 전압 차의 제곱에 비례한다. 이러한 비선형 힘(nonlinear force)의 성질에서 탐침 전압(probing voltage)과 시료의 전압의 혼합항을 분석하면 시료 표면의 정전위 정보를 알 수 있다. 따라서 위상맞춤증폭기(lock-in amplifier)로 각각의 진동항을 분리함으로써 높낮이(topography)와 표면 전위(surface potential)를 독립적으로 측정하였다. 또한 전기용량 힘의 비선형 현상과 혼합항이 존재하는지 확인하기 위해 시료의 DC 전압을 연속 인가하면서 탐침의 정변위(static deflection)와 혼합항(ω 성분)을 측정하였다. 전기용량 힘(capacitive force)의,

탐침과 시료 사이의 전기용량 크기에 대한 의존성을 조사하기 위해 탐침과 시료 사이의 거리를 변화시키면서 전기용량을 측정하였다.

그림 3.3.5는 탐침 전압과 시료의 전압의 혼합 현상을 보여준다. 시료의 전압을 변화시키면 ω lock-in 출력은 시료의 전압에 비례해서 변하고 있다. ω lock-in의 출력은 정전위 측정법(scanning potentiometry)의 되먹임 회로(feedback loop)의 에러(error) 신호로 사용되어 진다. 한편, 전기힘현미경(electrostatic force microscope, EFM)을 작동시 탐침과 시료 사이에는 강한 인력(static attraction)이 존재한다. 이러한 흡착(adhesion) 효과는 탐침이 시료 표면에 접촉되는 순간 탐침을 역학적으로 불안정하게 반응하도록 할뿐만 아니라 탐침을 시료 표면에 가두어 두는 효과를 발생시킨다. 본 연구에서 탐침 효과를 연구하기 위해 탐침과 시료 사이에 직류 전기장 변화로서 흡착력(adhesion force)의 크기를 변화시키면서 진동 진폭을 측정하였다. 탐침이 시료 쪽으로 접근할 때 진동 진폭은 증가하다가 표면 흡착(surface adhesion)에 의해 갑자기 진동이 사라지게 된다. 이것은 탐침이 시료 표면에 갇혀서 진동을 하지 못하기 때문이다. [그림 3.3.6]

나. 정전기적 태핑 모드의 개발

정전위 측정법은 탐침과 시료 사이에 작용하는 정전기적 힘을 이용한다. 본 연구의 초기에는 탐침과 시료 사이의 일정한 거리를 유지시키기 위해 반데발스 힘(van der Waals force)을 이용하고자 하였다. 그러나 정전기적 힘(electrostatic force)이 탐침(probe tip)에 인가되면 강한 인력으로 인해 반데발스 힘을 검출하기 힘들뿐만 아니라 탐침과 시료 사이의 거리를 안정 되게 제어하기 힘들다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해 정전기적 힘을 이용한 태핑 모드(tapping mode)를 개발하였다. [Hong 1996] 정전기적 태핑 모드(electrostatic tapping mode) 기술을 이용하면 탐침과 시료 사이의 거리를 안정되게 유지시킬 수 있을 뿐만 아니라 높은 수평 배율의 영상을 얻을 수 있다. 기존의 태핑 모드 기술은 압전 바이모프(piezo bimorph)를 이용하여 일정한 진폭으로 탐침을 진동시키면서 시료의 상을 얻는다. 따라서 강한 정전기적 힘이 인가되는 경우 안정돼 작동이 어렵다. 한편 정전기적 태핑 모드는 압전 바이모프와 같은 부가적인 요소를 사용할 필요가 없어 보다 간단한 헤드(head - 탐침과 시료를 포함하는 현미경의 중추)를 구성할 수 있다. 본 연구 그룹에서 개발한 태핑 모드는 부도체, 반도체, 도체 뿐만 아니라 부드러운 시료도 관찰할 수 있는 장점이 있다.

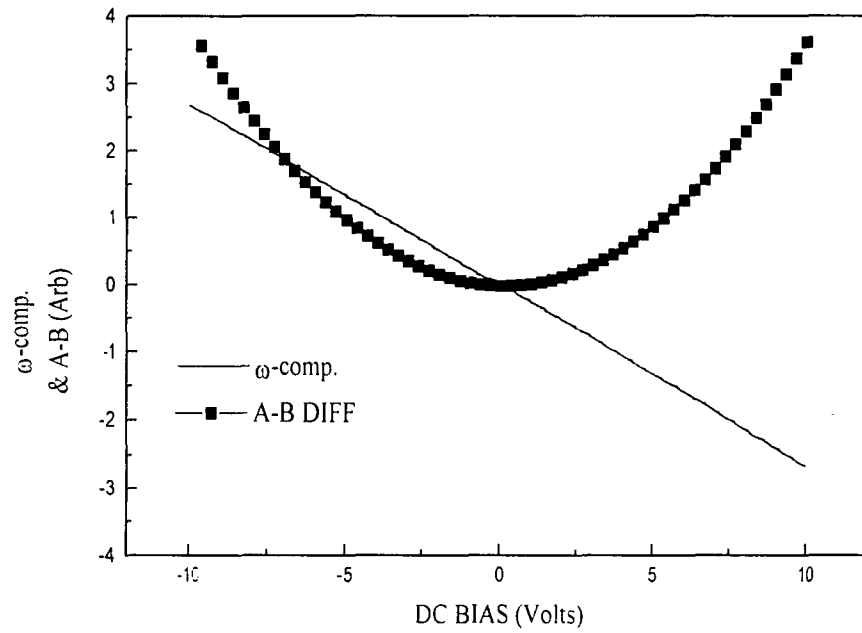


그림 3.3.5. 힘의 ω 성분은 탐침과 시료 사이의 전압에 비례한다. 이 결과는 탐침 전압과 시료의 DC 전압이 비선형 힘에 의해 혼합된 결과이다.

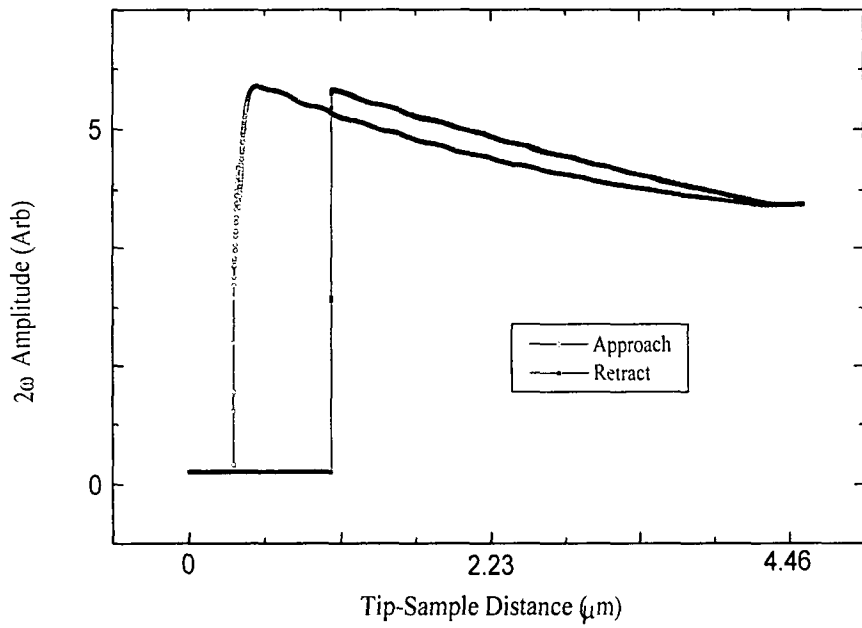


그림 3.3.6. 거리에 따른 2ω 진동항의 크기. 표면의 흡착력에 의해 시료에 가까이 다가가면서 갑자기 진폭이 0이 되는 것을 볼 수 있다.

정전기적 태핑 모드 작동 방법은 교류 전압으로 탐침을 진동 시킬 때 수식 (3.3.8)과 같이 2ω 진동 성분의 진폭을 lock-in으로 측정하여 되먹임으로 일정하게 유지시키면 순수한 표면의 높낮이 정보를 얻는 것이다. 태핑 모드를 작동시킬 때 강한 정전기적 인력에 의해 탐침이 시료 표면에 붙잡히는 현상을 막기 위해 탐침의 진동 진폭은 충분히 크게 설정해 두어야 한다. 이러한 현상을 연구하기 위해 힘-거리 곡선에 대한 연구를 하였다. 힘-거리 곡선은 시료와 탐침 간의 상호 작용에 대한 중요한 정보를 포함하고 있다. 그림 3.3.7(a)와 3.3.7(b)는 힘의 상수가 다른 실리콘 탐침의 힘-거리 곡선을 나타낸다. 각각의 그림에서 위쪽의 곡선은 순수한 정전기적 힘의 효과로 발생하는 교류 성분이다. 아래쪽의 곡선은 전형적인 힘-거리 곡선의 직류 모드를 보여 주고 있다. 그리고 그림 3.3.7(a)는 힘의 상수가 작은 탐침에 대응하는 곡선이며 그림 3.3.7(b)는 상대적으로 큰 힘의 상수를 갖는 탐침에 대응된다. 힘-거리 직류 곡선에서 알 수 있듯이 EFM이 공기 중에 작동하거나 정전기적 힘이 존재할 때는 흡착력이 상당히 커지는 것을 알 수 있다. 힘-거리 직류 곡선에서 탐침을 먼 거리에서부터 시료 쪽으로 접근시키면 진동 진폭이 증가하는데 이것은 탐침과 시료 사이의 전기용량이 증가하기 때문이다. 힘의 상수가 작은 탐침에 대해서 힘의 교류 성분이 갑자기 사라지므로 태핑(두드리기) 영역이 존재하지 않는 반면 큰 힘의 상수를 갖는 탐침은 시료에 가까이 접근함에 따라 태핑 효과로 인하여 진동 진폭이 감소하는 영역이 나타난다. 태핑 모드 동작은 이 영역에서 이루어지며 힘의 상수가 흡착력을 극복할 수 있을 정도로 커야만 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 태핑 모드에서 피드백은 태핑 진폭을 일정하게 유지하도록 작동한다. 또한 그림 3.3.7에서 비접촉 영역에서 작동되면 정전기적 비접촉 모드 작동도 가능하다. 이 영역에서 탐침과 시료 사이의 거리가 상대적으로 멀기 때문에 수평분해능이 작아진다. 본 연구에서 두 가지 영역에서 작동을 시도 비교해 본 결과 태핑 모드로 얻은 영상이 훨씬 좋은 결과를 보여 주었다. 또 다른 태핑 모드 장점 중의 하나는 표면을 훑는 동안에 시료가 받는 횡적 힘과 종적 힘을 극소화 할 수 있다는 데 있다. 왜냐하면 태핑 모드가 작동중일 때 탐침과 시료의 접촉은 진동의 최저점에서만 발생하므로 접촉 시간이 상당히 작다. 따라서 태핑 모드로서 부드러운 시료나 약하게 흡착된 물질의 표면 형상을 쉽게 얻을 수 있다. 본 연구에서 약하게 흡착된 100 nm 크기의 라텍스 공(latex sphere) 영상을 얻는데 성공하였다. 하지만 보통의 작동 모드에서는 인가되는 횡적 힘 및 종적 힘이 크기 때문에 훑는 동안 탐침이 라텍스 공을 손상시키거나 움직일 수 있기 때문에 영상을 얻기가 거의 불가능하다.

다. 태핑 모드를 이용한 표면 전위 측정(Scanning Potentiometry)

정전기적 태핑 모드로서 탐침과 시료 사이의 거리를 일정 하게 유지시키면서 ω lock-in(위상맞춤 증폭기)의 출력을 측정함으로써 소자 표면의 전위 분포 측정을 시도하였다. 위에서 서술한 것과 같이 ω lock-in의 출력은 표면 전위에 직접적으로 비례하므로 ω lock-in의 출력이 표면 전위를 반영한다.

그림 3.3.8은 정전기적 표면 전위 측정법의 개략도를 나타낸다. 서로 다른 전위를 인가한 금속띠(metal strip)위에서 높낮이와 표면 전위 영상을 동시에 측정하였다. 그림 3.3.9(a), 3.3.9(b)는 각각 높낮이와 표면 전위 영상에 해당된다. 높낮이 영상에서 나타나지 않은 구조가 표면 전위 영상에서 흰 반점으로 나타난다. 이것은 금속띠 내부에 전기적 결함이 존재함을 암시한다. 왜냐하면 전기적 결함이나 낱알 경계(grain boundary)에서 전하가 축적될 수 있기 때문에 큰 전기힘 변화를 유도할 수 있다. 따라서 표면 전위 측정법은 작동중인 소자의 고장 분석에 적용될 수 있음을 시사해 준다. 본 실험에서 표면 전위 영상은 피드백없이 측정되었다. 피드백없이 얻은 전위 영상은 표준 전위에 의해 눈금 맞추기(calibration)가 되어져야 한다. 만약 피드백 회로가 구성되면 표준 전위에 의해 눈금 맞추기가 될 필요는 없다. 궁극적으로 본 연구에서 피드백 회로를 형성하여 복잡한 과정이 없이 직접 전위 영상을 얻는데 목적이 있으며, 현재 진행 중에 있다.

5. 결론

이상에서와 같이 전기힘현미경을 이용한 전위 측정법과 정전위 측정법에 대한 연구를 행하였다. 반도체 소자의 미세화, 복잡화는 필연적으로 소자의 기능 시험, 신호 검출에 있어서 보다 간편하고 비파괴적이며 높은 공간적 분해능을 가진 검사 도구를 필요로 한다. 전기힘현미경을 전기장을 인가하여 비접촉 모드로 구동함으로써 이러한 요구를 충족할 수 있음을 보였다. 앞으로 속도와 재현성에서 더 진보한다면 전기힘현미경은 반도체 산업의 양산 체제와 맞물려 보다 강력한 도구가 될 것으로 기대한다.

제 4 절 동적 접촉식 전기힘현미경의 개발

이 절에서는 우리가 개발한 동적 접촉식 전기힘현미경(dynamic contact mode electrostatic force microscope : DC-EFM)에 관한 동작원리와 이를 이용한 여러 가지 측정 결과들 - 표면 굽기 측정, 표면 전위 측정, 표면 전하 밀도 측정 등 -을 보여 주고자 한다[Hong 1999].

지난 십 수년동안 탐침훑기현미경(scanning probe microscope : SPM)은 도체뿐만 아니라 부도체의 표면을 원자 수준까지 보여 줄 정도로 개발되었다. 최근에는 표면의 역학적 성질 외에 표면 전위와 같은 전기적 성질과 표면의 전하밀도 측정 등을 측정하기 위해 많은 노력이 기울여졌다. 또한 이를 가지고 강유전성 구역을 볼 수도 있는데 이것에 관해서는 다음 절에서 논의하기로 하자.

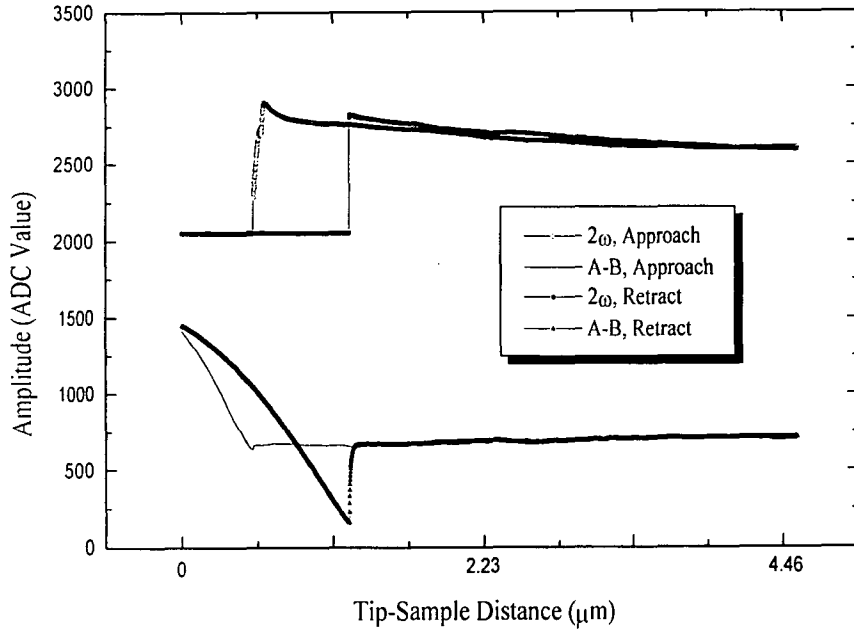


그림 3.3.7(a) 힘 상수가 작은 외팔보(cantilever)의 힘-거리 곡선

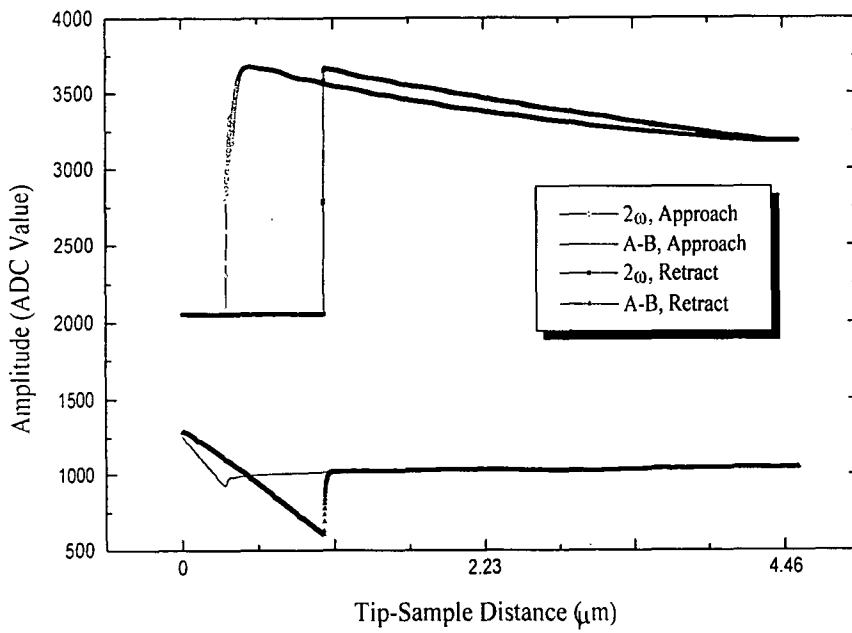


그림 3.3.7(b). 힘 상수가 큰 외팔보(cantilever)의 힘-거리 곡선

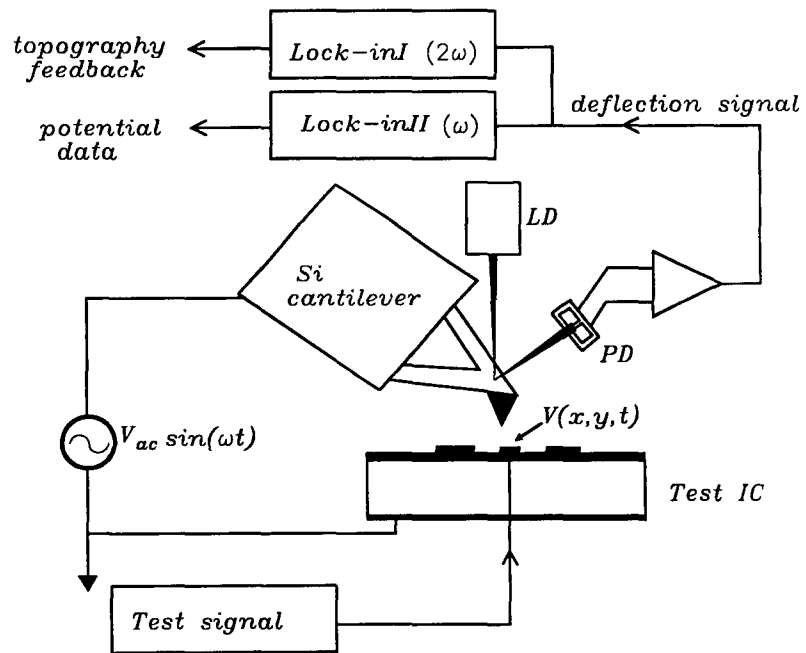


그림 3.3.8. 정전기적 전위 측정법(Scanning Potentiometry)의 개략도

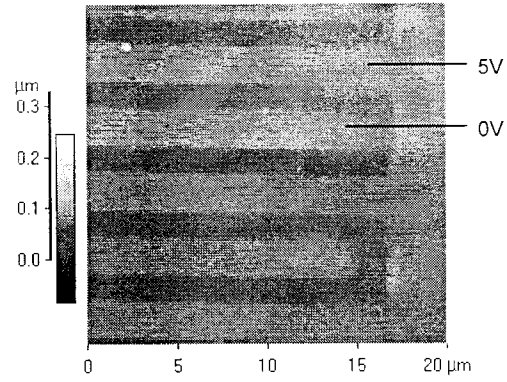


그림 3.3.9(a). 서로 다른 전위 0V와 5V를 분리된 금속띠(metal strip)에 인가한 상태에서 얻은 높낮이 영상.

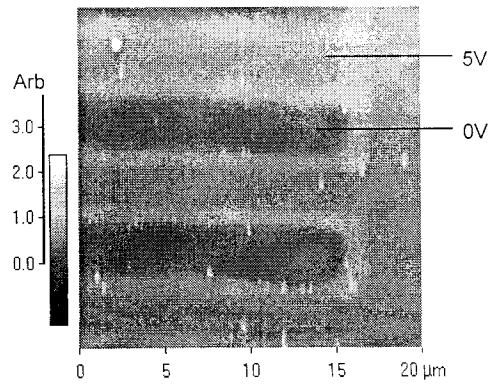


그림 3.3.9(b). 높낮이와 동시에 측정된 소자위에서의 전위 분포.

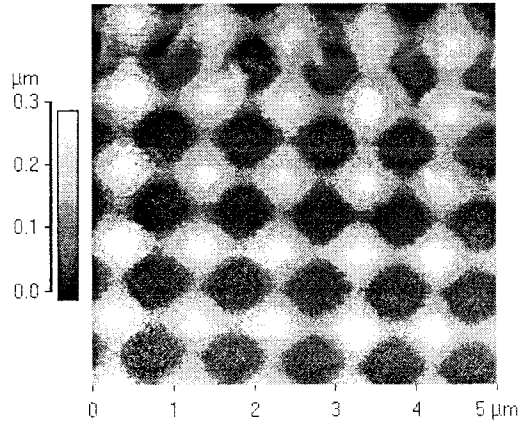
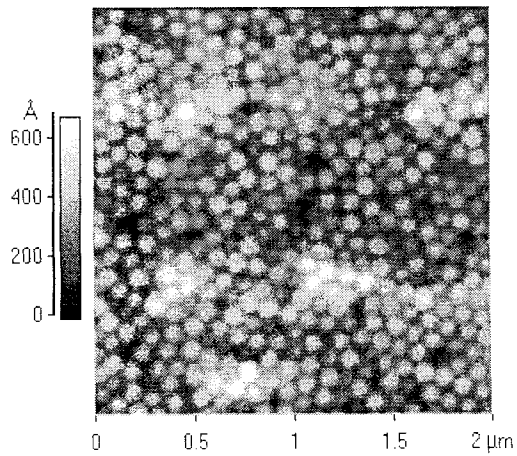


그림 3.3.10. 금이 표면에 입혀진 격자와 실리콘 기판 위에 분사 시켜 입힌 라텍스 공에 대한 표면상이다.

(a) 금이 코팅된 $1\ \mu\text{m}$ 주기의 격자.



(b) 실리콘 위에 뿌려서 입힌 라텍스 공.

초창기에는 시료 가까이에 탐침을 위치한 채 쌍떨개를 이용하여 사인모양의 작은 힘변조를 가해 힘의 물매를 측정함으로써 표면의 전기적 혹은 자기적인 값들을 읽어 내었다. 이를 힘변조현미경이라 하는데 여기서는 원래 탐침과 시료표면 사이의 힘만을 측정하여야 하나 힘의 변조를 쌍떨개의 떨림을 이용한 것이라 탐침 뿐만 아니라 주위의 다른 떨림이 복잡한 공명 현상과 원치 않는 역학적인 잡음을 탐침에 전해 주게 되어 이미지 해석에 어려움을 주게 된다. 이를 피하기 위해 시료와 탐침 사이에 교류 전압을 가하여 탐침만을 진동시켜 이런 해석의 어려움을 피할 수 있었다.

일반적인 전기힘현미경은 비접촉식으로 작동하는데 이 경우 진폭의 변화를 읽어 표면의 굴곡이나 다른 상호작용에 의한 힘의 물매를 읽어 낸다. 따라서 동적 비접촉식 전기힘현미경에서는 표면의 굴곡에 의한 효과를 다른 힘의 원인으로부터 분리해내기가 어렵다. 예를 들어 표면 전위의 갑작스런 변화와 시료 표면 위의 전하는 전기힘의 큰 물매를 야기하는데, 이때 탐침은 표면의 굴곡을 따라가지 못하고 반대 어발스 힘의 물매와 전기힘의 물매를 합친 등고선을 따라가게 된다. 이런 힘 물매의 섞임은 시료의 전기 성질을 측정하는데 계속적인 오차를 줄뿐 아니라 비접촉 방식을 오히려 복잡하게 하고 공간 분해능을 접촉식에 비해 현저히 떨어지게 한다. 왜냐면 탐침이 표면으로부터 10 nm 정도 떨어져서 작동하기 때문이다.

우리는 이러한 기존 전기힘현미경의 동작 방식의 문제점을 극복하였고, 표면 굴곡, 표면 전위, 표면 전하의 분포 등을, 교류 전압을 가한 접촉식 전기힘현미경(이를 기존의 비접촉식 전기힘현미경과 구별짓는 의미에서 동적 접촉식 전기힘현미경이라고 하겠다)을 이용하여 성공적으로 측정하였다.

1. 측정방법

동적 접촉식 전기힘현미경은 탐침과 시료의 거리를 일정하게 유지하는데는 접촉식 원자힘현미경의 원리를 이용한다. 그리고 직류와 교류 전압을, 전도성을 띤 탐침과 접촉해 있는 시료 사이에 가한다. 우리가 쓴 탐침은 힘상수가 1.9 N/m이면서 전도성을 높인 실리콘(도핑 수준이 10^{19} - $10^{20}/\text{cm}^3$)으로 만들어졌고 탐침의 끝반경은 20 nm이다. 탐침 끝의 자연 산화막 때문에 탐침과 시료 사이에는 전류가 못 흐른다.

동적 접촉식 전기힘현미경의 아이디어는 먼저, 전기적인 변조를 가했을 때는 접촉을 한 상황에서도 외팔보의 진동이 여전히 남아 있다는 것을 이용하였다. 즉 탐침이 시료 표면과 닿아 있는 동안에도 탐침의 진폭은 아직도 유한하게 남아 있게 된다. 이렇게 접촉한 상태에서도 유지되는 탐침의 진동은 힘현미경에서 이미 확인된 사실이다. [Maiviald 1991] 따라서 강한 원자 힘이 미치는 접촉시에서도 lock-in 기술을 이용하면 탐침과 시료의 약한 전기적 상호작용을 감별할 수 있다. 다음으로 탐침에 전압을 가하여 탐침의 전하량을 조절할 수 있고 이를 이용하여 탐침과 전하를 띤 시료 사이에 부가적인 힘을 제어할 수 있다. 따라서 표면의 굴곡을 측정하면서 동시에 표면 전위나 표면 전하 밀도와 같은 전기적 신호를 측정할 수 있다.

위치 r 에 있는 탐침 아래에 표면 전위가 주어지 있거나 전하밀도가 있을 때 탐침과 시료 사이의 일반적인 힘의 방정식은 원자 힘과 전기용량적인 힘, 그리고 탐침에 유도된 전하와 시료 표면의 전하 사이의 쿨롱 힘을 포함한다.

$$F(r) = F_a(r) + 1/2 \partial C(r)/\partial z V^2 + E_s(r)q_{tip}. \quad (3-4-1)$$

여기서 F_a 는 탐침을 밀치는 원자 힘을 나타낸다. 전기용량적인 힘을 나타내는 두번째 항에서 $\partial C(r)/\partial z$ 는 탐침과 시료 사이 전기용량의 물매인데 이는 탐침과 시료의 모양에 관계한다. 탐침과 시료 표면과의 전위차 V 에는 밖에서 걸어 주는 직류 전압 V_{dc} 와 교류 전압 $V_{ac} \cos \omega t$ 뿐만 아니라 시료의 표면 전위 V_s 까지 포함한다. $E_s(r)$ 과 $q_{tip} = C(V_{dc} + V_{ac} \cos \omega t)$ 는 각각 시료 표면의 전하밀도가 주는 전기장과 탐침에 유도된 전하량을 나타낸다. $V = (V_{dc} - V_s + V_{ac} \cos \omega t)$ 와 $q_{tip} = C(V_{dc} + V_{ac} \cos \omega t)$ 를 이용하면, 탐침에 작용하는 힘은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} F(r) &= F_a(r) + 1/2 \partial C(r)/\partial z (V_{dc} - V_s + V_{ac} \cos \omega t)^2 + E_s(r)C(r)(V_{dc} - V_{ac} \cos \omega t) \\ &= [F_a(r) + 1/2 \partial C(r)/\partial z (V_{dc} - V_s)^2 + 1/4 \partial C(r)/\partial z V_{ac}^2 + E_s(r)C(r)(V_{dc} - V_s)] \\ &\quad + [\partial C(r)/\partial z (V_{dc} - V_s) + E_s(r)C(r)]V_{ac} \cos \omega t + 1/4 \partial C/\partial z V_{ac}^2 \cos 2\omega t \end{aligned}$$

(3-4-2)

접촉식 전기힘 현미경은 접촉된 상태에서 작동하므로 힘(외팔보의 정적 힘)의 직류 성분은 z -되먹임회로에 의해서 고정되어 탐침과 표면사이의 강한 원자의 반발력은 상수로 유지된다. 따라서, 직류 성분의 영상은 원자힘 현미경의 일반적 표면 굴곡상과 같은 이미지를 준다. 반면, ω 성분은 V_s 또는 E_s 에 대한 정보를 준다.

만약 시료 표면이 충분히 단단하지 않고 굳기가 위치에 따라 바뀐다면, 표면은 정전기 힘 변조에 대하여 그에 상응하는 변위를 보일 것이다. 따라서 강한 정전기 힘은 탐침을 떨게해서 시료표면을 굽을 수도 있다. 진폭은 표면의 굳기와 정전기힘의 크기에 의존할 것이다. 이런 경우, 탐침과 시료사이의 전기용량(또는 전기 용량의 물매)은 표면 굳기의 의존성을 보일 것이다. 우리는 굳기와 탐침진동의 상대적 진폭사이의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(r, \omega) = k_{eff}(r, \omega) z(r, \omega) \quad (3-4-3)$$

여기서 $z(r, \omega)$ 는 정전기힘 $F(r, \omega)$ 에 의한 위치 r 에서의 탐침 진폭을 나타낸다. 따라서 시료표면에서 표면전하와 전위분포가 없다면, 정전기힘은 거의 상수에 접근시킬 수 있다. 더욱이, 직류와 교류 전압을 일정하게 유지시킨다면, 정전기 진동의 ω 성분을 측정함으로써 유효굳기 k_{eff} 의 변화를 결정할 수 있다.

$$k_{eff}(r, \omega) = F(r, \omega)/z(r, \omega) \quad (3-4-4)$$

위상 맞춤 증폭기는 진동수 ω 의 탐침 진폭과 위상을 측정하는데 사용된다. 이 측정동안 힘의 직류 부분은 접촉 방식에 있어서 일정한 높이를 유지하기 위한 되먹임신호로 쓰인다. 따라서 표면굳기에 따른 표면굴곡 효과의 섞임을 피할 수 있다. 그림 3-4-1은 동적 접촉식 전기힘현미경의 개략도이다. 탐침-시료 높이를 일정하게 유지시키는 굴곡 되먹임 제어기로부터의 신호는 표면굴곡을 형상화하는데 이용할 수 있다. 되먹임제어기 II를 끈 상태에서 위상 맞춤 증폭기의 출력은 표면전위 또는

표면전하밀도의 감지에 이용될 수 있다. 표면전위 또는 표면전하밀도의 절대값 측정에 있어서 V_{dc} 를 제어하는 되먹임제어기 II신호를 측정할 수 있다. 이 때 ω 성분의 진폭(위상 맞춤 증폭 출력)은 영이다.

2. 실험 결과

동적 접촉식 전기힘현미경으로 굳기를 측정하여 GaAs/epoxy/GaAs 다층을 보았다. 두 개의 GaAs웨이퍼 중앙에 부드러운 epoxy층을 붙여서 만든다. 그림 2는 다른 기계적 굳기의 영역을 가진 연마된 표면을 동시에 얻은 굴곡[그림 3-4-2(a)]과 굳기[그림 3-4-2(b)]를 보여준다. 이 측정에서 걸어진 직류전압, 교류전압의 진폭과 진동수는 각각 1V, 5V, 40kHz이다. 굴곡상은 거의 GaAs-epoxy-GaAs 세 개층이 보이지 않는다. 그러나, ω 성분에 의해 얻어진 상은 명백히 세 개의 층을 보여준다. 중앙의 epoxy층이 두 개의 GaAs층 영역보다 부드럽기 때문에, 진동수가 ω 일 때 epoxy영역에서 탐침 진폭은 GaAs영역에서보다 크다. 따라서 정전기힘에 의한 탐침 진동의 ω 성분은 시료표면의 국지적인 굳기를 보여준다. 접촉식 전기힘현미경은 기계적 변조를 야기했던 쌍떨개를 사용한 초기의 힘변조현미경보다 기계적 굳기를 측정하는 데 더 큰 유리한 장점을 지니고 있다. 힘변조현미경은 일반적으로 현미경계의 여러 진동을 유도하여 해석이 애매모호하다. 그러나 정전기변조는 탐침 외팔보계의 모든 부분을 흔들림없게하고 단지 외팔보만 진동시킨다. 따라서 우리는 깨끗한 진동분광을 얻을 수 있다. 결과적으로 전자식 접촉힘현미경은 원하지 않는 잡음원과 주요 신호의 섞임을 방지할 수 있는 것이다.

표면전하밀도가 없고 시료표면위의 표면전위가 V_s 라면, 식 (3-4-2)의 ω 성분은 간단히 $\frac{\partial C}{\partial z}(V_{dc} - V_s)$ 가 된다. 따라서 전자식 접촉힘현미경은 집적회로에서 pn 접합 또는 신호선처럼 표면전위 V_s 가 있을 때 ω 성분을 찾아냄으로써 전위차계처럼 작동될 수 있다. 표면전위의 절대값을 측정하기 위해서 되먹임회로는 탐침의 직류전압($V_{dc,p}$)을 고정하는 데 사용되는데 이 경우 ω 성분의 진폭은 영이된다. 이 때 탐침에 걸어진 직류전압은 표면전위와 같다. 그림 3-4-3은 이런 경우를 보여주는데 그림 3-4-3(a)는 표면 굴곡을, 그림 3-4-3(b)는 표면 전위상을 보여준다. 여기서 자취의 한 부분은 +1V의 전압이, 나머지 부분은 -1V의 전압이 걸린 상태이다. 얇은 SOG층은 시료의 윗부분을 덮고 있다. 따라서 우리는 표면굳기가 전표면에 있어서 균일하다고 가정할 수 있다.

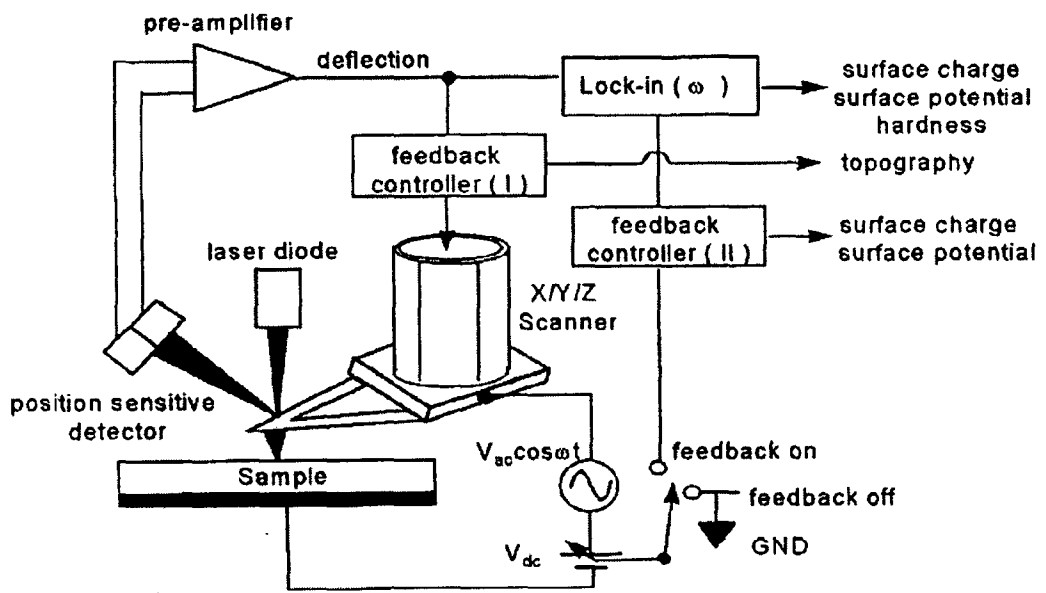


그림 3-4-1

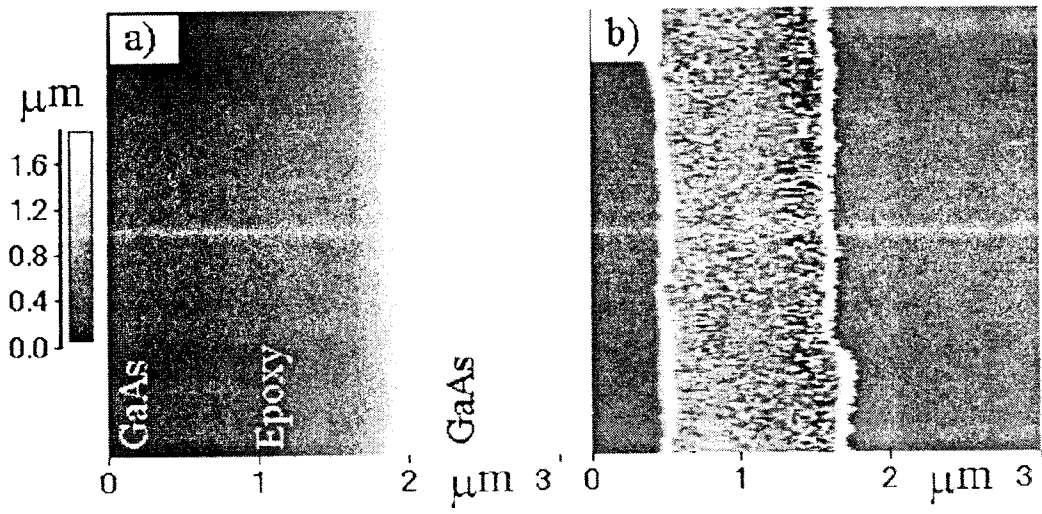


그림 3-4-2

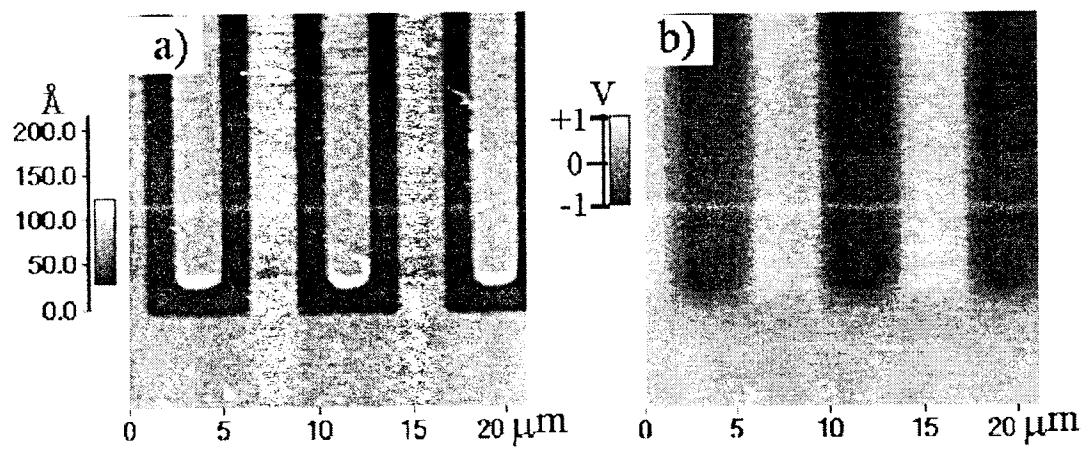


그림 3-4-3

굴곡상에서, 두 개의 금속선(밝은 영역)은 예칭한 유전영역과 분리된다. 표면전위상에서, 우리는 예상한 것처럼 퍼텐셜의 윤곽이 예칭된 영역에서 선형적으로 변함을 발견할 수 있다. 이 전위차계는 약 $\sim 20\text{mV}$ 를 가르킨다.

또다른 경우를 보자. 시료 표면이 속박된 표면전하밀도 σ_b 를 가지고 있다면, 정전기힘은 탐침과 시료사이의 쿨롱힘과 전기용량힘의 합으로 주어진다. 탐침끝과 시료사이의 거리는 접촉식에서 매우 짧기 때문에 균일한 표면전기장 E_s 에 의해서 속박 표면전하밀도의 효과를 근사할 수 있다. 만약 속박 전하영역이 유효 탐침끝의 면적보다 작다면, 이런 근사는 더 이상 유효하지 않다. 따라서 측면분해능은 탐침 반지름의 크기에 의해 제약을 받을 것이다. 그러나, 반지름이 20nm 인 탐침을 가지고 강유전체의 구역 구조를 연구하는 데는 유용할 것이다. 왜냐하면 이 구역의 크기가 일반적으로 탐침 반지름보다 훨씬 크기 때문이다. 이런 근사에서, 쿨롱힘은 간단히 $E_s q_t$ 로 표현되며, 여기서 $E_s = \sigma_b / 2\epsilon_0$ 는 균일한 표면전하밀도 σ_b 에 의한 전기장, q_{tip} 은 걸어준 전압 $V = V_{dc} + V_{ac} \cos \omega t$ 에 의해 탐침에 유도된 전하량이며 $q_t = CV$ 이다. 그림 4는 교차하는 표면전하밀도 σ_b 와 표면으로부터 위치 x 와 높이 z 의 함수로써 주어지는 triglycine sulfate(TGS)단결정의 전형적인 값인 폭 $w = 2\mu\text{m}$ 의 한 강유전 선 구역에 대한 계산된 전기장을 보여준다. 우리가 위에서 가정했던 것처럼 10nm 보다 작은 높이에 대해서는 균일한 표면전기장 $E_s = \sigma_b / 2\epsilon_0$ 에 의한 표면전하밀도의 효과를 설명할 수 있다. 큰 전기장 변화가 두 개의 다른 전하밀도가 충돌하는 구역경계 근처에서 나타난다. 예로 10nm 보다 큰 탐침높이에 있어서, 중요한 힘물매가 그림 3-4-4에서처럼 나타난다. 따라서 속박된 표면전하밀도가 있는 경우 접촉식 전기힘 현미경에서 정전기힘의 ω 성분은 V_{dc} 와 표면전하밀도 σ_b 모두에 의존하는 $(\partial C / \partial z V_{dc} + \sigma_b C / 2\epsilon_0)$ 가 된다. 따라서, 외팔보 진동의 ω 성분의 측정은 강유전체의 표면전하밀도 또는 구역상을 보게 된다. 굴곡상은 전자식 접촉식 현미경에서 탐침이 훑는 동안 일정하게 탐침의 높이를 유지하도록 하는 척력의 원자력(dc성분)에 의한 되먹임 신호로부터 얻을 수 있다. 탐침과 시료사이의 전기용량이 접촉식 전기힘 현미경의 작동에 있어서 일정하게 유지되기 때문에, 접촉식 전기힘 현미경의 ω 성분 $(\partial C / \partial z V_{dc} + \sigma_b C / 2\epsilon_0)$ 로부터 얻어진 구역상은 자주 굴곡과 구역구조가 섞인 것을 보여주는 재래의 비접촉식 전기힘 현미경과 다른 굴곡상으로부터 잘 분리된다. 상온합의 기원을 이해하기 위해 비접촉식 전기힘 현미경으로 강유전구역의 탐침시 정전기힘 물매의 효과를 알아 보자. 그림 3-4-4에서 보여지는 것처럼 큰 전기장 물매는 두 반대 전하 분포가 만나는 구역경계 근처에서 나타난다. 더욱이 탐침과 시료의 거리가 10nm 보다 큰 경우, 중요한 힘 물매는 측면을 따라서 나타난다. 비접촉식 전기힘 현미경의 경우, 굴곡 되먹임회로는 외팔보의 공명진동수에서 탐침의 진폭을 일정하게 유지하기 위하여 탐침과 시료의 거리를 일정하게 고정시킨다. 시료의 전기적 성질들은 외팔보의 공명진동수에서 벗어난 진동수로 직류와 교류를 걸어줌으로써 한꺼번에 측정할 수 있다. 따라서, 비접촉식 전기힘 현미경의 작동시, 표면전하에 의한 정전기힘 물매의 진동은 탐침진동의 공명진동수를 변경시킬 수 있다.

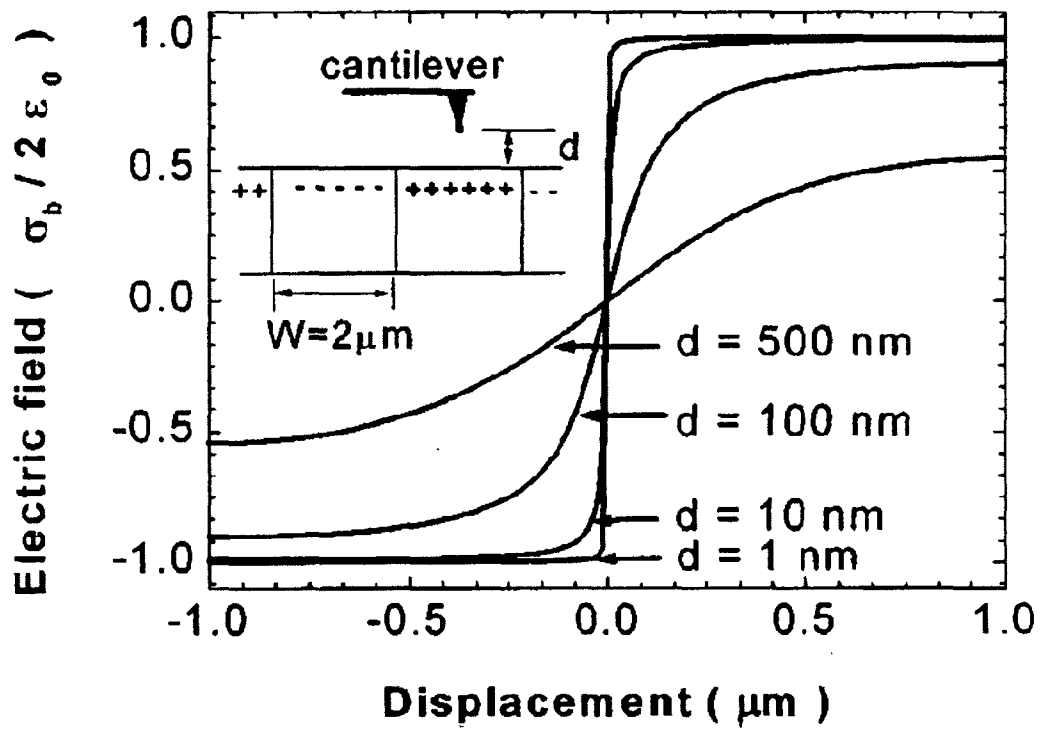


그림 3-4-4

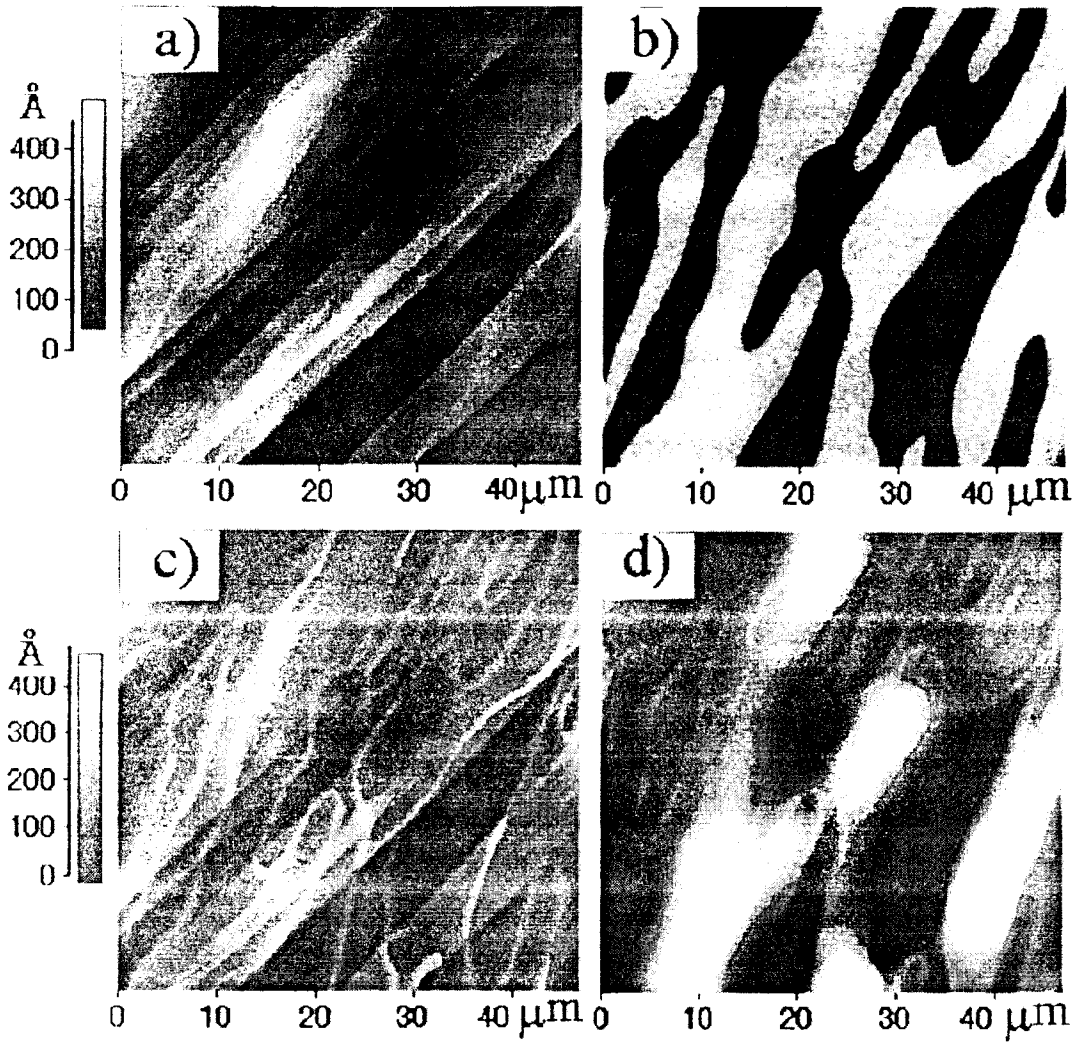


그림 3-4-5

그런 경우, 탐침끝은 반데어발스 힘 물매뿐만 아니라 정전기 힘 물매를 포함한 일정한 힘 물매 윤곽을 따른다. 따라서 일정한 힘 물매는 실제 표면 굴곡과 일치하지 않는다. 그러나, 접촉식 전기힘 현미경의 경우, 탐침끝과 시료 거리는 힘 물매 대신 척력적 원자힘에 의해 제어 된다. 따라서 굴곡상은 표면의 전기적 성질과 잘 분리된다.

그림 3-4-5는 동시에 얻은 TGS단결정의 상의 표면굴곡과 구역을 대조적으로 보여준다. 비교를 위해 상들은 접촉식 전기힘현미경과 재래의 비접촉식 전기힘현미경 모두에 의해 얻어진 상들이다. 쪼개진 TGS단결정은 ac결정면과 수직인 방향으로 극나뭇을 180° 구역으로 갖는다. 따라서 각 구역의 속박된 표면 전하밀도 $\sigma_b = P \cdot n$ 은 극성에 따라 양 또는 음이다. 그림 3-4-5(a)와 3-4-5(b)에서 보여지는 것처럼, 접촉식 전기힘현미경으로 동시에 얻을 수 있는 굴곡과 구역상은 서로에게서 잘 분리된다. 그림 3-4-5(b)에서 보여지는 상과 대비해서 구역상은 단지 180° 구역에 대하여 기대할 수 있었던 두 개의 명백한 레벨을 보여준다. 그러나, 비접촉식 전기힘현미경에 의해 얻어진 표면굴곡[그림 3-4-5(c)]와 표면 전하상[그림 3-4-5(d)]은 혼합된 상들을 보여준다. 표면굴곡상에서, 높여진 대조는 강한 정전기 힘 물매가 존재하는 구역경계를 따라서 나타난다. 비접촉 작동에 있어서, 굴곡상은 정전기 힘 물매와 반데어발스 힘 물매의 얽힘이다. 따라서 탐침끝은 일정한 탐침과 시료의 분리 윤곽이라기보다 일정한 힘 물매 윤곽을 보여줄 것이다. 비접촉 작동[그림 3-4-5(d)]에 의해 얻어진 구역 대조는 접촉식 전기힘 현미경에 의해 얻어진 것[그림 3-4-5(b)]과 비교했을 때 훨씬 혼합된 상을 보여준다. 그러나 넓은 구역에 대한 극성은 구분할 수 있다. 이 흑백 레벨 대조는 그림 3-4-4에서 보여지는 것처럼 표면 전기장의 행동에 의해 설명될 수 있다. 탐침의 거리가 10nm보다 더 높은 경우, 전기장은 구역경계 근처에서 점차적으로 변한다. 추가적으로, 좁은 구역위의 전기장세기는 넓은 구역위의 전기장의 세기보다 훨씬 약하다. 탐침이 표면에서 멀리 있을 때, 탐침에 미치는 정전기 힘은 표면 전기장세기의 감소에 의해서 감소될 것이고 탐침과 전극 사이의 전기용량 감소로 인해 탐침에 유도된 전하도 감소될 것이다. 따라서 구역 영상은 공간적으로 평균적인 대조를 보이고 또한 측면 분해능을 감소시킨다. 따라서 접촉식 전기힘현미경과 같은 접촉 작동은 비접촉 방식보다 더 좋은 공간적 분해능뿐만 아니라 더 좋은 구역 대조 영상을 제공한다. 구역 영상의 탐지에 있어서 압전반응 방법 또는 옆힘현미경과 비교하였을 때 접촉식 전기힘현미경의 장점은 강유전체의 구역 구조의 직접적 제어와 표면 전하밀도의 수량적 산정에 대한 방법을 제공할 수 있다는 데 있다. 되먹임신호는 V_{dc} 를 제어해서 ω 성분 즉, $(\partial C / \partial z V_{dc} + \sigma_b C / 2 \epsilon_0)$ 의 진폭을 영이 되게 한다. 따라서 표면 전하밀도는 여기서 구한 직류전압 $V_{dc,n}$ 과 $\sigma_b = -2 \epsilon_0 V_{dc,n} (\partial C / \partial z) / C$ 의 관계를 갖는다. 접촉식 전기힘현미경은 1mm만큼 작은 탐침과 시료의 유효거리 d 와 접촉 방식에서 작동되기 때문에 탐침과 시료 사이의 전기용량은 결과적으로 $(\partial C / \partial z) / C \approx 1/d$ 를 갖는 평행판 도체 축전기로서 간주될 수 있다. 따라서, 우리는 접촉식 전기힘현미경에서 되먹임 신호로부터 직접적으로 강유전체의 표면전하밀도를 측정할 수 있다. 만약 탐

침 끝에 강한 직류 전압을 건다면, 접촉식 전기힘현미경으로 구역 구조를 제어하는 것도 가능하다. 이에 대해서는 다음 절에서 다룬다.

3. 토론

탐침과 전극사이의 교류 변조전압을 걸어줌으로써 발생한 정전기 힘 변조는 심지어 접촉된 상태에서도 외팔보의 진동과 탐침에 유도된 전하의 진동을 유발한다. 강한 원자힘이 있음에도 불구하고 탐침에 유도되는 전하와 접촉시에도 여전히 남아 있는 진동은 위상 맞춤기술을 이용해서 약한 전기힘도 측정할 수 있다.

따라서 접촉식 전기힘현미경은 표면 균기에 대한 힘 변조 현미경으로, 표면 전위 분포에 대한 전압계로, 또는 강유전 구역에 대한 전하 밀도계로 사용될 수 있다. 접촉식 전기힘현미경은 재래의 비접촉식 전기힘현미경보다 훨씬 더 나은 공간 분해능을 보여주고 표면 전기적 성질을 보다 깨끗하게 측정할 수 있다.

더욱이, 표면굴곡, 표면전위, 그리고 표면 전하 영상은 접촉식 전기힘현미경에 있어 서로 잘 분리되어 속박된 표면 전하밀도의 수량적 계산과 구역 구조의 제어를 가능하게 한다. 그러나, 표면전하밀도를 수량적으로 계산하려면 탐침과 시료 사이의 거리를 아주 정확히 측정하여야 한다. 본 실험에서는 외팔보의 힘-거리 곡선으로부터 이 간격을 10%의 오차내에서 추정할 수 있었다. 마찬가지로 이 오차범위 내에서 표면전하밀도도 측정할 수 있었다.

제 5 절 강유전체 구역 관찰 및 구역 쓰기

앞 절에서 보았듯이 외팔보가 교류전압에 의해 변조되었을 때 유한하게 떨 수 있음을 알아냈고 심지어 탐침이 강유전체의 단단한 표면과 접촉시에도 관찰되었다. 또한 이러한 남아있는 떨기를 이용함으로써 잘 분리된 표면굴곡과 구역대조영상을 동시에 얻을 수 있었다. 이 절에서는 이를 이용하여 강유전체를 보다 자세히 관측하고 강유전 구역을 반전시킨 결과를 보여 주고자 한다.

1. 강유전체 구역 관찰[Hong 1998a]

TGS의 구역대조와 표면굴곡 영상들은 직류전압 V_{dc} 를 영으로 맞추어 놓고 동적 접촉식 전기힘 현미경에 의해 동시에 측정되었다. 탐침과 시료사이의 측정된 거리는 $\sim 1nm$ 인데 탐침의 떨기의 진폭으로부터 얻어졌다.

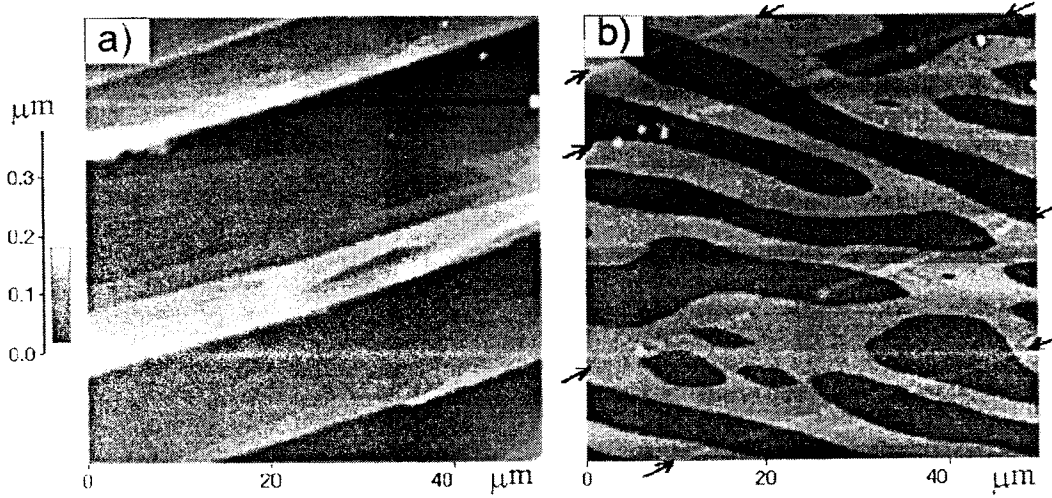


그림 3-5-1

그림 3-5-1은 $V_{ac}=0$ 이고 주파수 $f=40kHz$ 를 가진 $V_{ac}=5V$ 에서 동시에 얻어진 TGS(010)의 잘 분리된 표면굴곡과 구역대조영상이다. 여기엔 보이지 않지만 TGS표면의 확대된 표면굴곡 영상은 조개집 계단들이 $\sim 12\text{\AA}$ 라는 것을 보여주는데 격자단위 $b=12.69\text{\AA}$ 와 매우 가깝다. 구역영상이나 구역경계는 이 실험의 표면굴곡 영상에서는 보이지 않는다. 이전에는 편극된 시료의 압전효과는 편극에 의존하는 그러한 표면굴곡 높이 차이를 일으킨다고 생각되었다. 구역대조는 일반적으로 식 3-4-2에 기초한 우리의 예상과 잘 일치하는 두가지 준위(two level) 대조를 보인다.

그러나 구역대조를 주의깊게 보면 그림 3-5-1(b)의 화살표에 지시된 것처럼 표면의 조개진 계단들을 따라서 희미하게 그림자진 표면굴곡 영상을 관찰할 수 있다. 구역대조에서 표면굴곡 그림자가 나타나는 것은 조개진 표면의 계단 끝에서 정전용량 C 의 맹렬한 국소 떨기의 결과로써 이해할 수 있다. 일정한 정전용량 작동과 같은 동적 접촉식 전기힘 현미경의 일정한 높이 작동이 계단 끝을 훑는 동안도 멈추지 않는다. C 에서 C' 까지의 계단에서 정전용량의 변화는 마치 동적 접촉식 전기힘 현미경의 일정한 높이 조작을 유지하기 위해 전하밀도 $\sigma_b'=\sigma_b C'/2\epsilon_0$ 의 변화가 있는 것처럼 ω 성분 $\sigma_b C'/2\epsilon_0$ 의 변화를 보일 것이다. 계단 끝에서 관찰된 흐릿한 표면굴곡 영상들이 나타남은 우리의 분석이 정확하다는 것을 나타내는 증거이다.

그러나 구역 구조는 조개진 표면의 조개집 계단이나 기울기에 의해 영향을 받지 않는다. 이전 논문과 같이 표면굴곡 영상에서 구역장벽과 연관된 돌출되거나 함몰된 계단이 없다. 압전 변형에 의해 돌출이 생겼다는 설명은 전기화학 활동도(activity)라는 대안 원인을 제안한 Takata에 의해 또한 의문이 제기되었다. 물론 앞과 뒤의 훑기 방향에 의존하는 구역영상에서 어떠한 hysteric 행동도 관찰할 수 없었다.

구역 구조의 일반적인 모습은 이전 논문들에서 보고된 모양과 비슷한 손가락 모양이나 늘어진 볼록 렌즈모양을 보인다. 늘어진 볼록 렌즈 모양은 TGS의 비등방(anisotropy)이 있다면 a-c 평면의 방향에 의존하는 구역장벽 폭의 편차를 기대할 수 있다. 그림 3-5-2는 반장축 $a=1.17\mu\text{m}$ 이고 반단축 $b=0.53\mu\text{m}$ 인 거의 타원 모양의 양으로 편극된 작은 구역을 나타낸다. 장축의 끝에서 구역모양은 60° 에서 120° 범위의 각을 가지는 덜 모난 귀퉁이를 보인다. 그래서 타원보다는 볼록렌즈 모양이 TGS구역의 모양을 기술하는데 더 적절하다.

이러한 특정구역의 20°C 에서 측정된 전형적인 구역 장벽 두께는 반장축 반단축을 따라서 각각 $\sim 110\text{nm}$ 와 $\sim 60\text{nm}$ 이다. 훑기 방향에 의한 어떠한 인공물(artifact)을 피하기 위해 다른 각도에서 몇 개의 구역들의 장벽두께를 측정하였다. 물론 시료에 의존하는 구역장벽의 두께에서 약간의 편차는 있다. 어느 한순간 구역 장벽 두께의 상당히 큰 편차를 관찰했는데 반단축 방향에서 30에서 80nm 범위를 보였다. 그러나 장축과 단축의 장벽두께의 비율은 여전히 1.8에 가까웠다. 물론 이번 실험에서 보고된 구역장벽의 전형적인 값은 유한한 탐침반경 때문에 $\sim 40\text{nm}$ 가

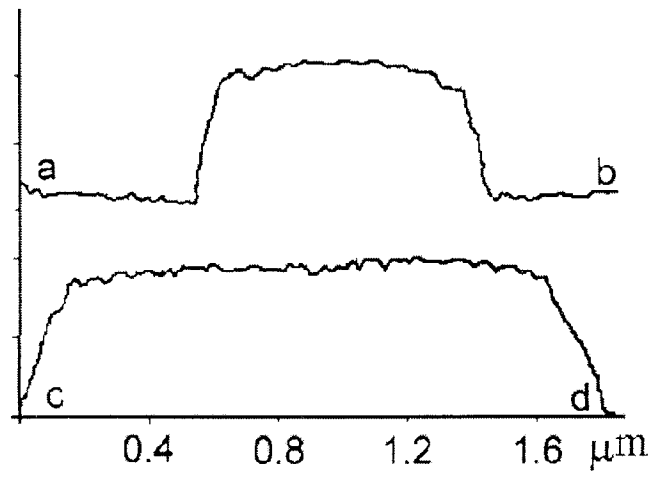
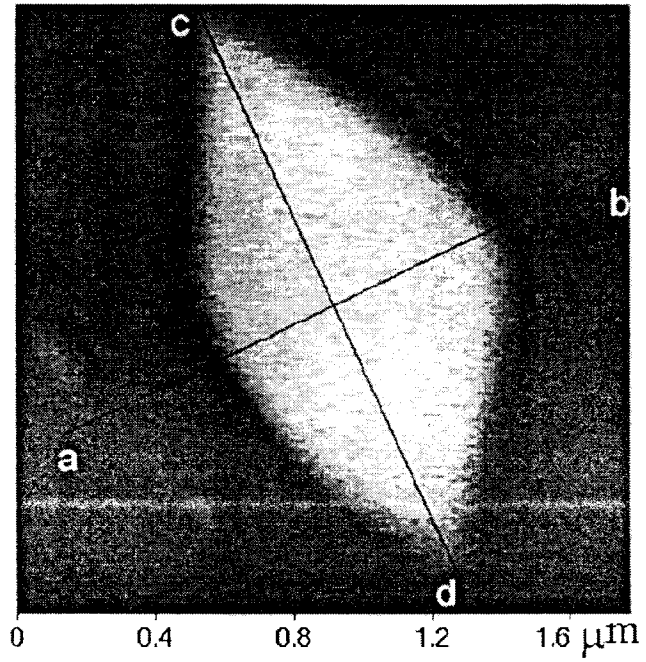


그림 3-5-2

상한값(upper limit)이다. 이러한 값은 보고된 값인 10nm와 8nm보다도 훨씬 큰데 600~800nm보다는 훨씬 작다.

편극에 의해 유도된 구속 표면 전하 밀도 $\sigma_b = P \cdot n$ 을 측정하기 위해 한가지 시도가 이루어졌다. 식(3)의 F_e 에서 ω 성분은 $\partial C/\partial z V_{dc} + \sigma_b C/2\epsilon_0$ 에 비례하므로 원리적으로 ω 성분의 진폭으로부터 σ_b 를 계산해 낼 수 있다. $V_{dc} \neq 0$ 인 경우 σ_b 를 계산하는데 어려움이 있는데 Ogahmi 등이 지적한 바와 같이 표면전하밀도에 $|F_w|$ 의 비대칭적인 의존이 있기 때문이다. 심지어 $V_{dc} = 0$ 일 때도 구속 전하밀도를 계산하기 위해서는 탐침과 시료사이의 정전용량을 알아야한다. 더군다나 시료위의 결함(defects)들이나 국소전하 등에 의해 유도된 전압이 전하밀도에 대한 분석을 복잡하게 할 수 있다. $|F_w|$ 의 진폭을 측정하는 대신에 $|F_w|$ 의 진폭이 사라질 때까지 직류탐침전압 V_{dc} 를 조정할 수 있다. 이러한 nulling 방법에서 표면전하밀도는 $\sigma_b = -\epsilon_0 V_{dc,n} (\partial C/\partial z)/C$ 처럼 null 전압 $V_{dc,n}$ 과 연관된다. 이러한 nulling 방법은 진폭측정에 몇가지 장점이 있는데 예를 들면 nulling 방법은 C 와 $\partial C/\partial z$ 의 절대값에 대한 필요성이나 $|F_w|$ 의 비대칭 특성과 관련된 모호함을 극복할 수 있다. 이번 실험에서 전자빔 현미경은 접촉방식에서 작동하는데 탐침과 시료사이의 거리가 1nm만큼 작고 탐침과 시료사이의 정전용량은 $(\partial C/\partial z)/C \cong 1/d$ 인 평행판 축전기로 취급할 수 있는데 여기에서 d 는 탐침과 시료사이의 거리이다. 20 °C에서 각각 양으로 음으로 편극된 TGS구역들과 일치하는 nulling 전압 $\delta V = V_{dc,n}^+ - V_{dc,n}^-$ 의 차이는 3.1V로 측정되었고 오차는 0.1V보다 적었다. 탐침과 시료사이의 거리 d 에 대한 떨기 진폭이 평균거리 d 와 같다고 가정하였다. 외팔보의 떨기진폭신호(90~110mv)의 크기와 18nm의 높이표준이 합쳐진 매우 큰 척도의 편향 신호(1.9V)의 크기와 비교해서 $d = 1 \pm 0.1nm$ 를 얻었다. 불확실성은 주로 떨기진폭신호의 요동때 일어났는데 이 방법으로 얻어진 20 °C에서 TGS의 표면전하밀도 $\sigma_b = 2.7 \pm 0.3 \mu C/cm^2$ 이다. 이것은 탐침과 시료사이의 간격을 crude하게 계산을 고려한다면 보고된 값인 $2.8 \mu C/cm^2$ 와 잘 일치한다. σ_b 의 값을 더 정확하게 계산하기 위해서 탐침과 시료사이의 간격거리를 알아야 된다. 또한 주목해야할 점은 탐침과 시료사이의 유효한 정전기 거리가 탐침표면의 절연층이 존재하기 때문에 측정된 값이 틀려질 수 있다는 것이다. 그러므로 σ_b 값이 잘 일치하는 것은 탐침과 시료사이의 유효한 거리의 어림에 대한 대안적인 방법으로 간주될 수 있다.

잘 정의된 구역대조는 동적 접촉식 전기빔 현미경으로부터 얻어질 수 있으므로 TGS에서 강유전성 구역 구조의 전개(evolution)를 연구했다. TGS의 구역 역학(dynamics)에 대한 루띠(Luthi)등에 의해 이전에 시도된 것은 단지 구역경계의 영상들만 얻을 수 있는 비접촉 방식 작동이었다. 게다가 훑는 동안 탐침에 가해진 영이 아닌 V_{dc} 를 걸어주었는데 이것은 연구중인 구역들의 모양을 바꿀 수 있다. 또한 저항 힘 현미경을 TGS에서 구역변화를 연구하는데 사용하였다.

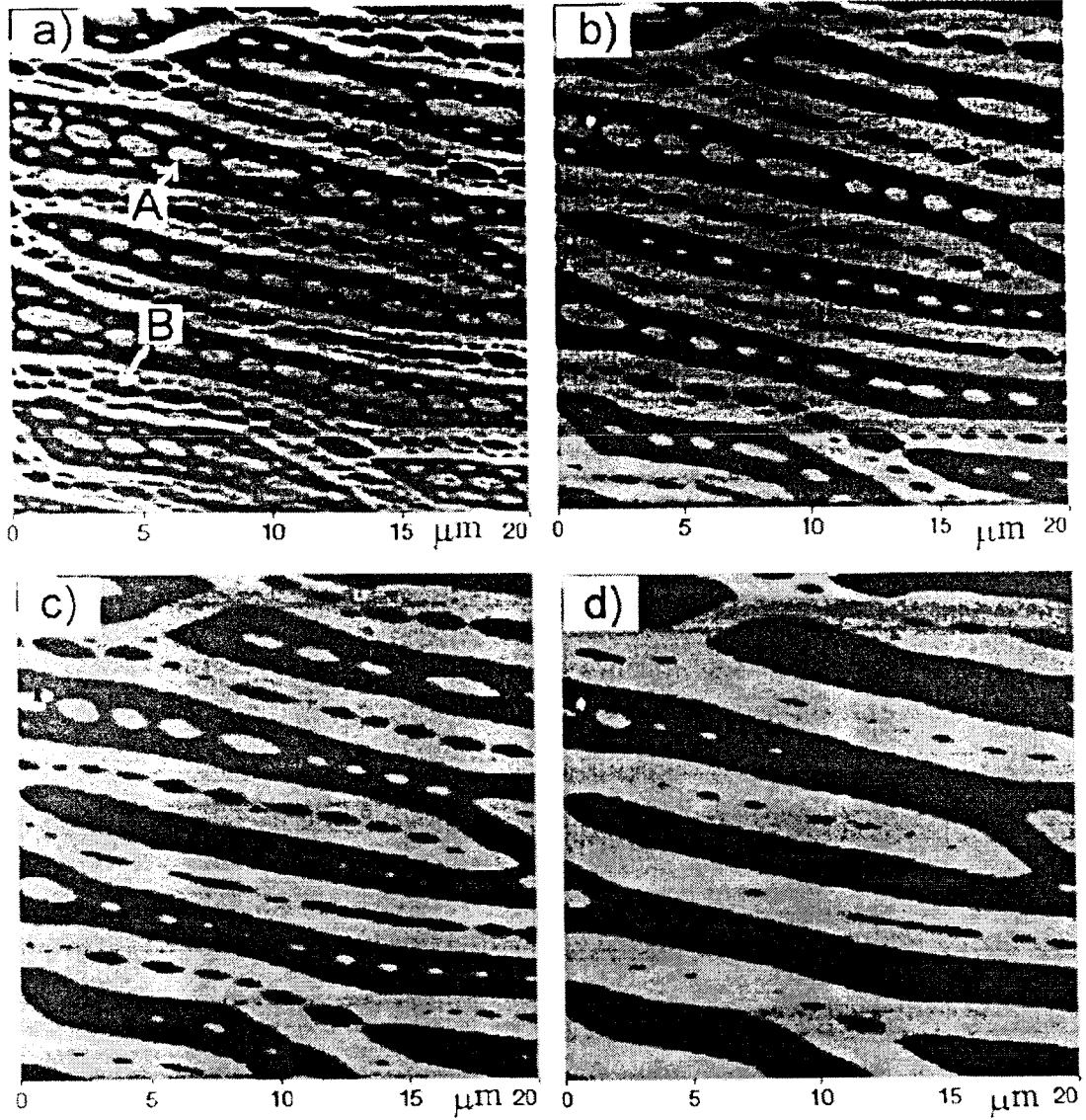


그림 3-5-3

이번 실험에서 구역의 전개(evolution)를 조사하기 위해 TGS 시료를 큐리온도 이상으로 가열하여 비평형상태를 만든 다음 다시 이어서 실내온도인 20 °C로 다시 냉각시켰다. 확실히 T_c 이상에서는 구역대조가 사라졌다. 냉각후 30초가 조금 안되어 시료온도는 공기중에서 평형 상태온도에 도달했다. 이러한 이유 때문에 실내온도로 냉각하고 나서 30초 후에 TGS구역의 영상들을 얻기 시작했다. 이전 냉각기간에서 급격한 구역 전개(evolution)가 있기 때문에 훑기 속도가 1Hz보다 빠르면 구역영상을 얻기가 사실상 불가능하다. 매 4분간격으로 1시간동안 구역영상들을 얻었는데 그림 4는 1시간정도 계속적으로 얻어진 TGS구역영상을 보여준다. $\sim 2\mu\text{m}$ 의 평균 구역폭을 가진 손가락모양의 구역안에는 많은 반대로 편극된 볼록 렌즈모양이 있는데 같은 편극의 몇몇의 더 작은 위성 구역들이다. 이러한 반대로 편극된 손가락모양의 구역들에 의해 파묻혀있는 고립된 구역들은 점차적으로 사라졌다. 그러나 손가락 모양같은 구역은 측정시간인 1시간동안 크기나 모양이 변하지 않았다. $V_{dc}=0$ 에서 관찰된 양으로 편극된 구역의 영역은 구역 전개동안 음으로 편극된 구역의 면적과 같게 남아있었는데 이것은 $20 \times 20 \mu\text{m}$ 의 척도에서 구역 방향의 우선권이 없음을 나타낸다.

그림 3-5-3(a)에서 화살표에 의해 지시된 각각 양과 음으로 편극된 두 개의 특별한 고립된 구역들의 크기는 주위의 위성 구역들이 사라질 때까지 증가하는 경향을 보이다가 위상구역들이 사라질 때 고립된 구역의 크기는 감소하기 시작한다. 그림 7은 그림 3-5-3(a)에 보이는 화살표에 의해 지시된 두 개의 고립되었고 반대로 편극된 구역들의 시간 의존적인 구역 크기를 보여준다. 초기에 증가 경향을 제외하면 고립된 구역은 거의 선형적으로 감소하는 특성을 보인다. 반면 손가락모양의 구역의 폭은 가상적으로 $2.4 \pm 0.04 \mu\text{m}$ 에서 일정하게 남아있다. 우리의 실험에서 더 큰 크기의 구역의 모양은 -이 경우 손가락 모양의 구역-더 짧은 완화시간에 고정되는 반면 더 큰 구역에서 파묻힌 조그마한 구역의 전개는 20 °C TGS의 경우 1시간의 차수보다 더 긴 완화시간에 의해 결정된다는 것을 볼 수 있다. 같은 편극의 이웃하는 구역들 사이의 상호작용이 없다면 반대로 편극된 구역들에 의해 둘러싸인 작은 구역들의 크기는 단지 monotonically 감소하는 경향을 보여야만 한다. 그러므로 반대로 편극된 구역에 포함된 작은 구역들에서 관찰된 크기의 복잡한 편차는 같은 편극의 인접한 구역들 사이의 상호작용에 연류된 것처럼 방해받는다.

끝으로 탐침 전압하에 편극반전은 관찰되었고 구역반전은 가해진 탐침전압 V_{dc} 의 크기와 지속정도에 의존한다. 구역크기나 모양의 변화와 같이 새로이 생성된 구역의 전개는 표면상태에 의존하는 것처럼 보인다. 예를 들면 TGS의 새로이 쪼개진 표면에서 원래의 편극에 대해 반전된 편극의 급격한 완화(relaxation) 때문에 구역반전을 관찰하는 것이 오히려 어렵다. 그러나 많은 퇴화한(degraded) 평면층이 구역에너지를 낮게 함으로써 pinning 효과를 만들었다고 가정하였다. 그림 8(a)에서 화살표에 의해 지시된 검은 점들은 탐침전압 $V_{dc} = -10\text{V}$ 에서 퇴화한 표면(1주일 이상 공기에 노출된 표면)위에 쓰여졌다.

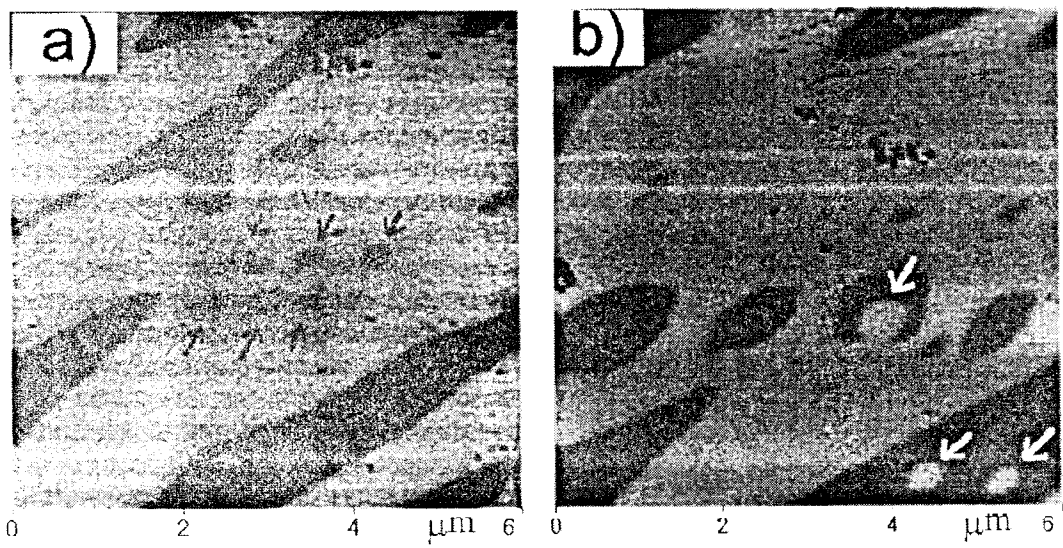


그림 3-5-4

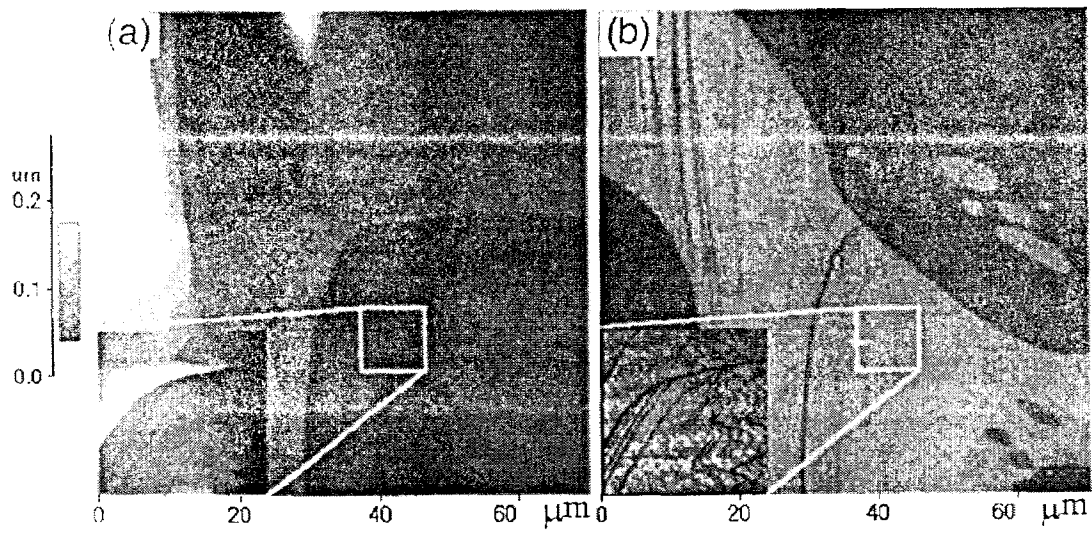


그림 3-5-5

처음에 원형에서 볼록렌즈 모양으로의 모양변화는 구역들의 전개 때문이다. 이로부터 검은 대조의 극성은 양으로 편극된 구역과 일치함을 확인할 수 있었다. 그림 8(b)의 흰 점들은 $V_{dc}=10V$ 하에 쓰여졌다. 이번 실험에서 구역반전에 대한 문턱전압은 약 7V이다. 7V의 전압하에 탐침 주위의 전기장은 약 $1.7 \times 10^8 V/m$ 이고 보고된 $10^4 \sim 10^5 V/m$ 차수의 강제적인(coercive) 장보다 훨씬 강하게 나타났다.

2. 강유전체 구역 쓰기[Hong 1998b]

이 실험에 사용된 탐침은 앞에서와 같은 실리콘 탐침으로 용수철상수 $k=1.9 N/m$ 이고 탐침의 반지름 $R=\sim 40 nm$ 이다. 탐침의 표면이 SiO_2 산화물층으로 입혀진 것처럼 보이는데 이것이 방전효과를 방지하는데 도움을 준다. 강유전성 시료와 전극판사이의 접촉은 은 페인트로 만들어져 있고 탐침과 전극판사이에 내부전압이 가해져있다. 그림 3-5-5은 (a) 표면굴곡과 (b) 동적 접촉식 전기힘 현미경(DC-EFM)에 의해 20 °C 에서 얻어진 TGS 단결정의 구역대조영상을 보여주고 있다. 여기에 보여진 영상들은 공기중에 새로이 쪼개진 TGS 표면으로부터 얻어졌다. TGS의 표면 형태는 공기에 3시간 이상 노출된 후에 점차적으로 변하는데 흡수된 물분자들로 인한 식각 때문에 고립된 언덕(islands)이나 구멍을 형성한다. 이러한 영상을 얻기 위해 사용된 전형적인 변수값들은 주파수 $f=40 kHz$ 이고 $V_{ac}=5 V$ 인 변조진폭과 Lock-in 증폭기의 시간상수는 1ms 이고 주사속도가 1 line/s 였다. 구역대조는 예상한대로 180 °와 일치하는 두 가지 준위(level) 대조를 보여주는데 양과 음으로 편극된 영역을 보여준다. 구역대조에서[그림 3-5-5(a)] 밝은 지역은 양으로 편극된 구역과 일치하는데 이것은 탐침전압을 걸어주었을 때 구역대조의 변화에 의해 확인되었다. 우리의 실험시스템으로 얻을 수 있는 수평분해능은 $\sim 10nm$ 보다 좋고 수직분해능은 $\sim 0.1nm$ 정도이다. 이전 논문들과는 다르게 직류전압이 가해지지 않았음에도 단원자 쪼개짐(cleavage) 층과 일치하는 쪼개진 계단들을 보여주는 표면굴곡영상에서 구역과 관련된 어떠한 돌출이나 함몰이 보이지 않는다는 것은 주목할만하다. 표면굴곡 영상에서 구역경계선의 구역과 관련된 계단이나 돌출이 없는 것은 압전 반응 모형이 충분하지 않다는 것을 지적해 주는 것이다. 표면굴곡과 구역대조영상을 비교한다면 강화된 구역 대조 영상에서 흐릿한 선들이 나타난다. 이것은 표면굴곡 영상에서 쪼개짐 계단(cleavage steps)과 정확히 일치한다. 쪼개짐 계단을 따라서 흐릿한 선들이 나타나는 것은 앞에서 말한 환산전하밀도의 결과로 인한 쪼개짐 계단에서 정전용량의 갑작스런 변화에 의해 잘 설명할 수 있다. 그림 3-5-5(b)에 보인 바와 같이 양으로 편극된 구역대조의 확대된 부분은 Lock-in 증폭기의 이득을 조절함으로써 얻을 수 있다. 심지어 표면굴곡 영상(정확한 격자상수 $b=1.269nm$)에서 $\sim 1.2nm$ 의 단원자 층 계단과 일치하는 계단 경계들을 볼 수 있다.

쪼개진 계단을 따라 구역영상에서 흐릿한 선들이 나타나는 것은 동적 접촉식 전기힘 현미경의 분해능을 입증하고 또한 우리의 힘에 대한 분석이 타당성을 가진다

는 것을 입증하는 것이다. 예를 들면 구역 관측 메카니즘이 압전반응효과 때문이라면 구역영상에서 쪼개진 계단을 따라서 흐릿한 선이 보이는 것을 설명할 수 없다. 압전반응 모형에서 진폭은 쪼개짐 계단이 있는 것에 영향을 받지 않을 것이다.

정전기력의 ω 성분으로부터 전자밀도 σ_b 의 정량적인 계산에 의하면 탐침과 시료 사이의 정전용량의 정확한 값을 아는 것이 필요한데 쉽지 않은 일이다. 더 복잡한 것은 예를 들면 탐침과 시료사이의 국소 전하 효과에 의해 야기된 전압 때문에 일어날 수 있다.

이러한 복잡함을 피하기 위해 nulling 기술을 도입했다. 이것은 정전기 힘의 ω 성분을 되먹임회로에 대한 오류신호로 취함으로써 F_w 의 진폭을 없애기 위해 탐침 전압 V_{dc} 를 조정했다. 동적 접촉식 전기힘 현미경이 접촉방식에서 작용하기 때문에 탐침과 시료사이의 정전용량은 $(\partial C/\partial z)/C \cong 1/d$ 인 평행판 축전기로써 취급할 수 있다. 여기서 d 는 탐침과 시료사이의 거리이다. 탐침과 시료 표면사이의 간격 거리 d 는 힘상수 $k = 1.9 \text{ N/m}$ 인 탐침의 힘-거리 곡선으로부터 $\sim 1 \text{ nm}$ 로 계산되었다. 여기 간격거리 d 는 접촉방식에서 탐침의 남아있는 떨기의 진폭과 같다고 가정되었다. nulling 방법에서 표면전하밀도는 null 전압 $V_{dc,n}$ 과 연관되는데 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_n &= -2\epsilon_0 [V_{dc,n}(\partial C/\partial z)/C] \\ &\cong -2\epsilon_0 [V_{dc,n}/d]. \end{aligned} \tag{3-5-1}$$

nulling 전압에서 측정된 전압차이 $\delta V = V_{dc,n}^+ - V_{dc,n}^- = 2V_{dc,n}$ 는 20°C 에서 양으로 음으로 편극된 TGS 구역들과 일치하는 3.1 V 였고 측정오차는 0.1 V 미만이었다. 탐침의 산화물 표면층에서 전하덫들이 있었다면 δV 는 산화물 층에서 대전(charging) 효과 때문에 요동이 보였을 것이다. 그러나 δV 에서 요동이 없었다는 것은 이번 실험에서 덫들이 거의 없었다는 것을 암시한다. 몇몇 다른 TGS시료들로부터 얻어진 resulting 편극 전하밀도 $\sigma_b = 2.7 \pm 0.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 은 보고된 값 $2.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 과 아주 잘 일치한다. 이것은 우리가 계산한 탐침과 시료사이 거리 $d = 1 \text{ nm}$ 와도 잘 일치한다. 여기 편극 전하밀도에서 오차범위는 주로 간격거리 d 의 값에서의 불확실성 때문이다.

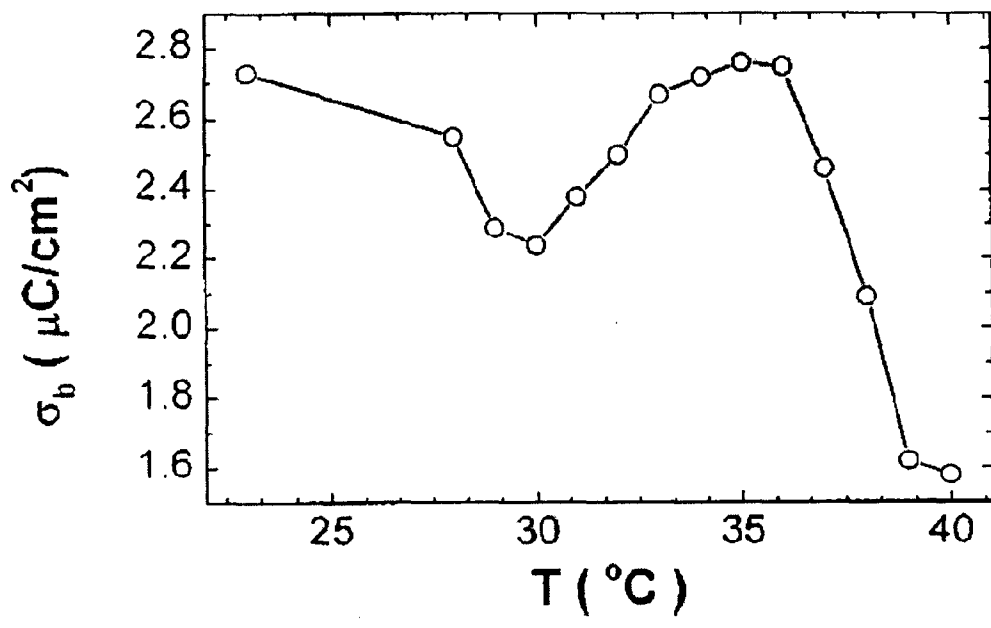


그림 3-5-6

nulling 방법으로 얻어진 온도 의존적인 표면 전하밀도는 그림 3-5-6에 보인다. 온도가 평형상태에 도달했을 때, 보통 3분이 안걸리는데, nulling 전압을 측정했다. $T_c (= 4.9^\circ C)$ 근처에서 구역의 급격한 온도 요동 때문에 전하밀도를 측정하는 것이 더 어려웠다. 그래서 표면전하밀도에 대한 안정적인 측정은 온도가 $\sim 40^\circ C$ 이하로 제한되었다. 그러나 예상밖으로 편극전하밀도에서 심각한 nonmonotonic 떨기가 있는데 이것은 $35^\circ C$ 주위에서 넓은 봉우리(broad peak)로 나타난다.

그림 3-5-7은 PZT 얇은 막의 (a) 표면굴곡과 (b) 구역대조영상을 나타낸다. 각각의 구역의 편극방향은 무작위인데 대조영상에서 흑색 눈금으로 나타난 부분이다. 따라서 PZT막은 원주형이 아니고 무작위로 향한 낱알 모양의 특징 (granular nature)을 가진다. 준비된 PZT막의 구역크기는 입자크기와 같은데 이것은 각각의 입자는 단일 구역(single domain)을 내포한다. 표면굴곡 영상은 PZT막의 평균입자크기가 약 $0.2 \mu m$ 라는 것을 보여준다.

그러므로 탐침에 양 또는 음 전압을 가해서 구역들을 재방향시킴으로써 무늬를 쓸 수 있게 한다. 그림 3-5-8은 $1 nm/s$ 에서 $50 \mu m/s$ 의 범위의 다른 쓰기 속도에서 $V_{dc} = -10 V$ 의 음 탐침전압을 걸어줌으로써 해서 쓰여진 선들을 보여준다. 심지어 쓰기 속도 (5×10^4)가 넓은 편차를 가지고도 선모양이나 반전된 구역 영상의 세기가 쓰기 속도에 대한 어떠한 주목할만한 의존성을 보이지 않았고 구역 재방향에 의한 낱알모양의 강유전성의 얇은 막위에 쓰기는 주로 쓰기 전기장의 강도에 의해 결정되었다. 쓰기 위한 문턱전압은 탐침이 시료 위를 훑을 때 탐침전압을 선형적으로 변화시킴으로써 연구되었다. 탐침전압을 그림 3-5-8(b)의 왼쪽 곁에서 $0V$ 로 시작해서 오른쪽 곁 끝에서 $10V$ 까지 증가시켰다. $4V$ 의 탐침전압이 걸리는 $4 \mu m$ 에서 구역반전의 시작을 알 수 있다. 그래서 이번 실험에서 연구한 PZT막에 의한 구역반전의 문턱전압은 $\sim 4V$ 로 나타났고 $40nm$ 의 반지름을 가진 전형적인 탐침에 대한 $\sim 8 \times 10^7 V/m$ 의 전기장과 일치한다.

동적 접촉식 전기힘 현미경을 사용해서 준비한 강유전성의 얇은 막의 쓰기 성능을 보여주기 위해 "SNU" 글자를 다른 PZT막 위에 썼다. 그림 3-5-8(c)와 3-5-8(d)는 그 글자를 쓰고난 직후 동시에 얻어진 구역과 표면굴곡 영상이다. 그림 3-5-8(c)에 보인 글자는 각각의 알파벳에 대해 크기가 $1.5 \mu m \times 2 \mu m$ 이고 이번 쓰기에서 얻어진 선분해는 표면굴곡 영상으로부터 얻어진 낱알들(grains)의 크기와 일치하는 $\sim 0.2 \mu m$ 였다. 수평선 분해는 막의 낱알의 크기에 의해 주로 제한된다.

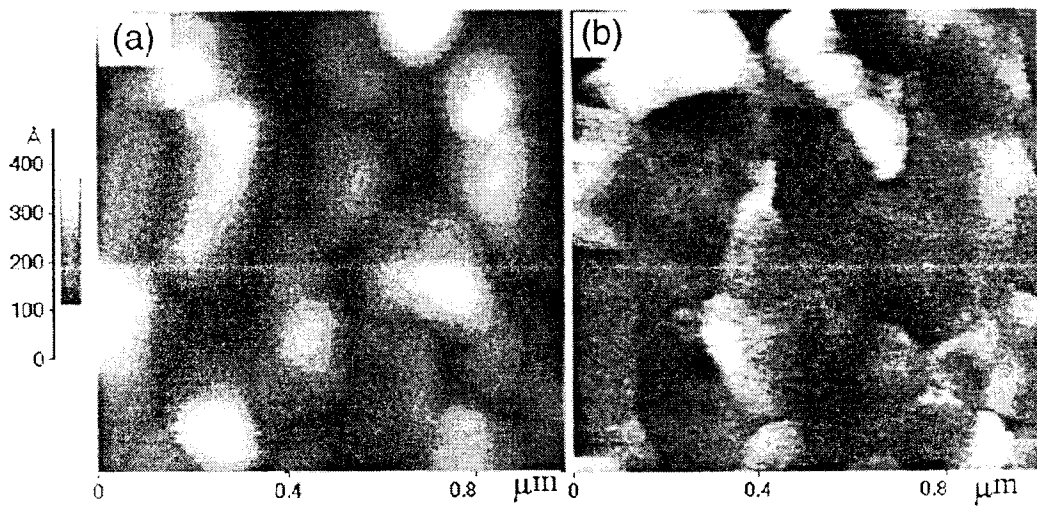


그림 3-5-7

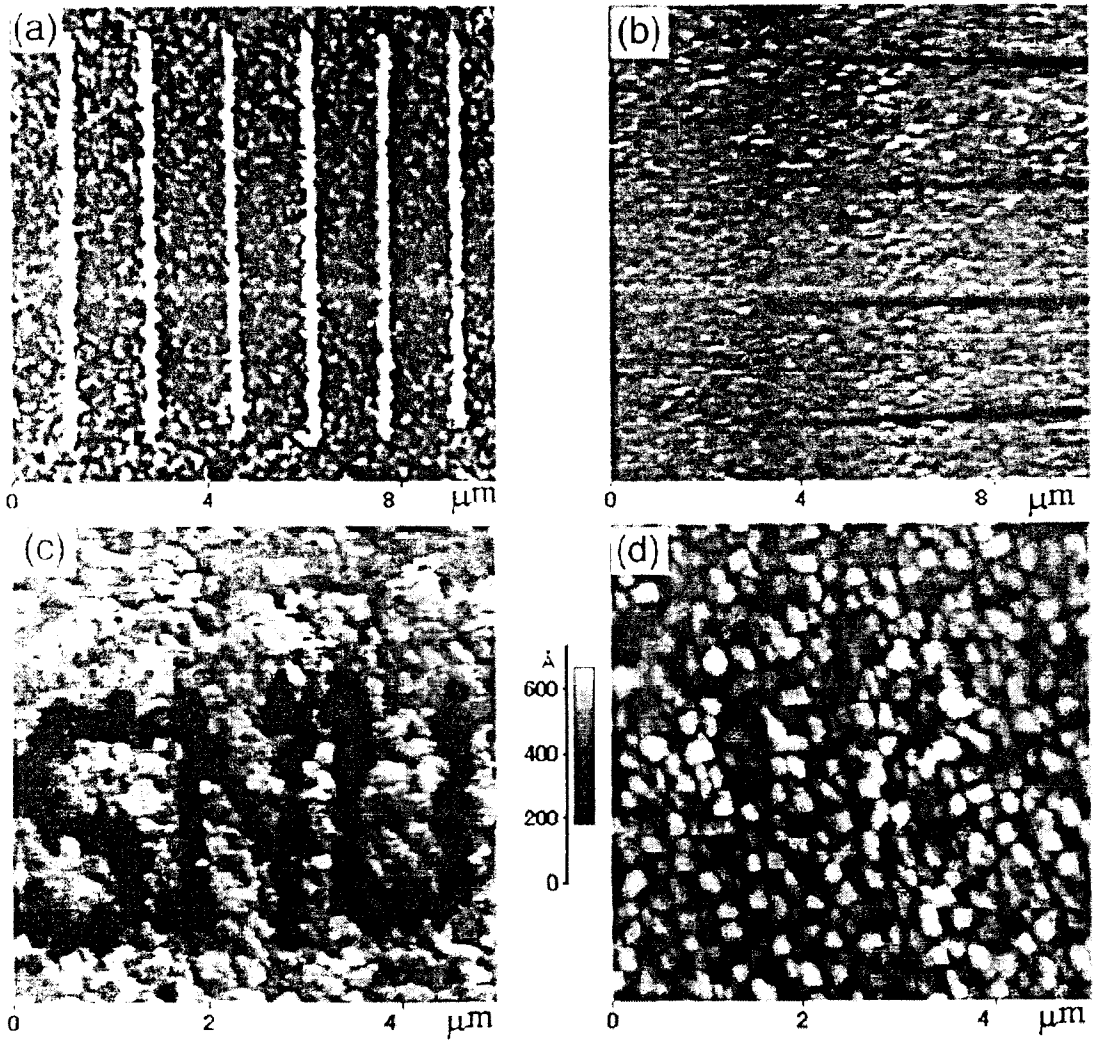


그림 3-5-8

~7V의 높은 문턱전압과 구역의 급격한 완화(relaxation)를 보이는 TGS 단결정과 비교하면 낱알모양의 PZT 얇은 막은 상대적으로 낮은 문턱전압과 완화를 보인다. 즉 낱알모양의 얇은 막에서 반전된 구역은 이번 측정의 시간 척도인 몇일동안 매우 안정적으로 지속되었다. 확실히 이러한 것들은 물질에 의존할 것이다. 그러나 반전된 구역의 응집에 의한 문턱전압은 또한 표면상태에 의존할 것이다. 그러한 표면상태는 물분자의 화학적인 흡착에 의해 일어나는 낱알크기나 표면 붕괴(degradation)인데 구역반전에서 표면에너지의 기여를 줄여줄 수 있다.

3. 결론

탐침과 하전된 표면사이의 정전기장에 대한 수정된 분석으로 TGS 단결정에서 표면전하밀도와 강유전성 구역들의 역학(dynamics)을 교류변조된 전기힘 현미경의 동적 접촉 방식 작동으로 연구하였다. 이 방법은 외팔보 떨기가 접촉상태에서 계속되었고 그래서 표면굴곡과 구역대조영상의 동시 측정이 가능하였다. 이전 저자들과 다르게 TGS에서 구역 형성 때문에 어떠한 표면모양도 관찰하지 못했다. TGS는 안으로 파묻힌 볼록렌즈모양의 반대로 편극된 구역들을 가진 손가락 모양의 180° 구역들을 보여준다. 이번 실험에서 얻어진 구속 표면전하밀도는 20°C에서 $\sigma_b = 2.7\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이고 보고된 값인 $2.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 과 아주 가깝다. 구역 장벽 두께의 상한 값은 비등방율이 1.8인 반장축과 반단축을 따라서 각각 ~110nm와 ~60nm이다. 반대로 편극된 구역에 파묻힌 구역들의 크기 편차는 같은 편차의 구역들 간에 중요한 상호작용이 있다는 것을 나타낸다. 작은 구역들의 완화는 거의 선형적인 시간 의존을 보인다. 더군다나 퇴화된 표면 층은 예를 들면 구역의 표면 에너지를 낮춤으로써 구역의 전개에 pinning 효과를 가지는 것처럼 보인다. 이번 실험에서 TGS 단결정위에 구역반전에 대한 문턱전압은 약 7V이다. 물론 온도의존이나 구역들간의 거리의존성 같은 더 자세한 연구가 강유전성 구역의 역학을 해명하는데 요구된다.

또한 탐침의 변조 유도된 전하와 시료표면 전하밀도사이의 쿨롱상호작용이 동적 접촉식 전기힘 현미경에서 강유전성의 구역대조영상을 만들 수 있다는 것을 볼 수 있었다. 잘 분리된 강유전성의 단결정과 얇은 막의 구역대조영상은 전기힘 현미경의 동적 접촉방식에 의해 얻을 수 있고 쪼개짐 계단들의 구역대조영상에서 흐릿한 선들이 나타나는 것은 우리의 분석의 타당성을 지지하는 증거로써 간주된다. 탐침과 편극된 표면사이의 힘을 수정된 분석에 의해 TGS에 대한 표면 편극전하밀도를 구할 수 있었다. TGS 단결정의 표면전하밀도는 보고된 값과 잘 일치한다. 전하밀도의 nonmonotonic 온도의존은 이런 물질의 편극의 세기에서 강한 온도와 연관된 요동때문이라고 믿어진다.

또한 동적 접촉식 전기힘 현미경의 구역 작동 성능은 다결정의 PZT막 위에 복잡한 무늬를 씌므로 해서 보일 수 있었다. 재방향된 구역의 선모양 또는 세기는 $50\mu\text{m}/\text{s}$ 를 넘는 쓰기 속도에 주목할 만한 의존성은 보여지지 않고 낱알모양의 강유전성 얇은 막위에 쓰기는 주로 쓰기 전기장의 세기에 의해 결정된다. 무늬의 선분해는 알갱이의 크기에 의해 결정되고 구역반전의 문턱전압은 이번 실험에서 연구한

PZT의 얇은 막에 대해 ~4V임을 알 수 있었다.

제 6 절 전기용량현미경을 이용한 표면 특성 연구

1. 서론

현재까지 잘 알려진 반도체 특성 방법은 공간적 제약에 의해서 이미 정밀성과 효율성에서 한계를 드러내고 있다. 이런 방법들 중에는, 전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope), 전자투과현미경(TEM, Transmission Electron Microscope), 이차이온질량분석기(SIMS, Secondary Ion Mass Spectroscopy), 박막 저항측정법(SRP, Spreading Sheet Resistance Profiling), 그리고 1차원에서 전압에 따른 전기용량 측정법(C-V, one-dimensional capacitance voltage)이 그동안 쓰여 왔다. 소자의 크기가 더욱 작아지면서 기존의 방법들이 공간적 분해능에 제약을 받게 되면서 새로운 탐색의 도구들이 필요해졌다. 최근 시료에 매우 근접한 검출 도구로서 많이 쓰이는 주사탐침현미경(SPM, scanning probe microscope) 가운데 하나인 원자힘현미경(AFM, atomic force microscope)과 전기용량 센서를 결합하여 만든 전기용량현미경(SCM, scanning capacitance microscope)은 높은 공간 분해능으로 말미암아 비파괴적인 반도체 소자의 특성 연구에 매우 강력한 장치로 등장하였다. 가령, 이온이 첨가된 반도체의 불순물 윤곽을 잡아내거나, [Williams 1989, Kopanski 1996, Yamamoto 1997, Kang 1997, Edwards 1998] 금속-산화물-반도체 구조의 전기적 특성을 알아보거나 [Tomiye 1996, Yamamoto 1996] 또 결합 분포도를 그려 내는 등 [Hansen 1998]의 시도가 SCM으로 성공적으로 수행된 연구가 보고되었다. 또 하나의 응용으로서 SCM은 반도체 내부에 전하를 가두거나 지우는 READ/WRITE 메모리의 가능성으로도 활용이 가능하다. [Barrett 1991, Barrett 1992] 기존의 전하 가둠 연구가 주로 실리콘 표면의 질소계 화합물 층에서 이루어진 반면, 금번 연구에서는 산화실리콘 층에서 전하가둠 실험이 실시되었다. [Hong 1999] 다음에서 우선 금속-산화물-반도체의 전기용량-전압의 특성을 논의하고 SCM의 동작 원리를 설명한 다음 MOSFET 소자의 2차원 전하밀도 측정과 산화실리콘/실리콘의 전하 가둠 현상에 대해서 연구의 성과들에 대해서 보고하고자 한다.

2. 금속-산화물-반도체(MOS)의 전기용량-전압(C-V) 특성

우선 이상적인 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 구조의 전기용량-전압(C-V) 특성을 이해한다. 여기서 산화물 내부에는 아무런 가둬진 전하가 없고 산화물과 반도체 계면(interface)에도 가둬진 전하들이 없다고 가정한다.

MOS는 금속과 반도체 사이에 절연층이 있어 축전기를 형성하는데, 여기에는 세 가지 동작 조건이 있다: 전하쌓임(accumulation), 비움켜 형성(depletion), 전하뒤집힘(inversion). p형 반도체의 경우를 보면, 금속 게이트(gate)에 반대쪽 전극보

다 낮은 전압이 걸리면- 실리콘 쪽을 접지시켰을 때 음부호의 전압 -, 산화층과 반도체 계면에 정공(hole)이 쌓이게 된다. 이것이 전하쌓임 상태인데, 이때 전체의 단위 면적당 전기용량은 두 금속 사이에 절연층을 끼웠을 때와 같은 값을 가지게 된다: $C_{acc} = C_{ox}$. 한편, 작은 양부호의 전압이 게이트에 걸리면, 비움켜(depletion region)가 실리콘 표면에 형성된다. 이 비움켜는 전하 이동이 없는 또 하나의 절연층처럼 작용하여 전체 전기용량은 산화층에 의한 전기용량과 비움켜에 의한 것 두 가지의 직렬 연결값과 같아진다: $C_{dep} = C_{ox}C_d/(C_{ox} + C_d)$. 비움켜 너비(depletion width)가 증가함에 따라 전체 전기용량은 감소한다. 전압값이 더욱 증가하여 실리콘 표면에 반대로 음전하(전자)의 농도가 정공의 농도보다 많아지기 시작할 때가 전하뒤집힘 임계점(threshold)이다. 그리고 이 때 비움켜 너비는 최대가 되며 전체 전기용량은 최소가 된다. 전하뒤집힘이 이루어지면, 공간 전하층 너비(space charge width)는 변함이 없는 채로, 게이트 전압의 작은 변화가 실리콘 표면의 뒤집힘 전하밀도 변화를 유도하게 되며 따라서 전체 전기용량은 전하쌓임일 때의 값으로 복원이 된다: $C_{inv} = C_{ox}$. 다만 이 때 게이트 전압이 얼마나 빨리 변하느냐에 따라 뒤집힘 전하의 반응 정도가 달라지므로 여기에는 저주파 특성과 고주파 특성이 차이를 보이게 된다.

그림 3.6.1은 게이트 전압과 이상적인 전기용량의 관계를 보여주는 그래프이다. 이 약한 전하뒤집힘(moderate inversion)이란 게이트 전극의 전압이 변함에 따라 공간전하밀도만이 변하는 지점과 뒤집힘 전하밀도만이 변하는 지점 사이의 전이 영역이다. 곡선에 나와 있는 점은 평전기용량(flat-band capacitance, C_{FB})라고 불리는 곳이다. 평판띠(flat-band) 전기용량은 산화층의 두께, 첨가물 밀도 그리고 온도에 따라 변한다.

이제 p형 반도체 기판에서 MOS 축전기의 주파수 의존도에 대해서 논의해보자. 뒤집힘전하밀도에 영향을 미치는 전자의 근원에 대해 생각해야 한다. 이들 전자들은 대체로 두가지 경로를 따라 생겨나는데, 하나는 p형 기판으로부터 공간전하지역(space charge region)을 통과해 들어온 전자들이며, 다른 하나는 공간전하지역에서 열적 흥분에 의해 생겨난 전자-정공쌍들이다. 두 가지 과정 모두 전자들을 일정한 비율로 생성시킨다. 뒤집힘 전하층에 있는 전자들은 순간적으로 밀도가 변하지 않는다. 만일 MOS 축전기의 게이트 전압이 빨리 변하면 뒤집힘 전하층의 전자들은 그에 반응하지 못한다. 따라서 C-V 특성은 측정을 위해 가해진 교류 전압의 주파수의 함수가 된다.

고주파영역에서 뒤집힘층전하는 축전기의 미소전압변위에 반응하지 않는다. 즉, 고주파영역에서는 게이트 전극에서 전하와 반도체 내부의 비움켜 너비만이 아주 작은 전압의 변화에 따라 반응한다. 따라서 전기용량의 고주파 특성은 전하뒤집힘 영역에서 $C_{dep\ min}$ 과 같아진다. 고주파와 저주파 극한에서의 축전기 특성은 그림

3.6.2와 같다. 일반적으로 저주파 특성은 100Hz 미만에서 나타나고 있다.

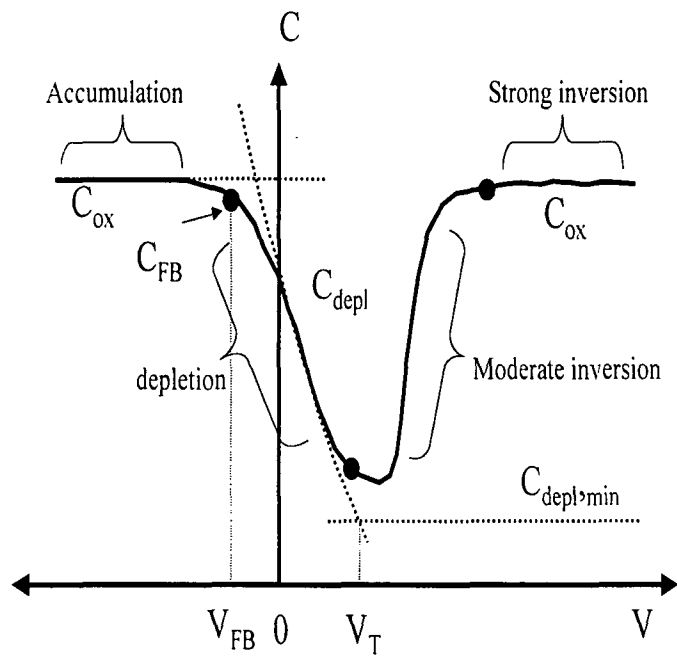


그림 3.6.1. 이상적인 p형 반도체의 C-V 곡선

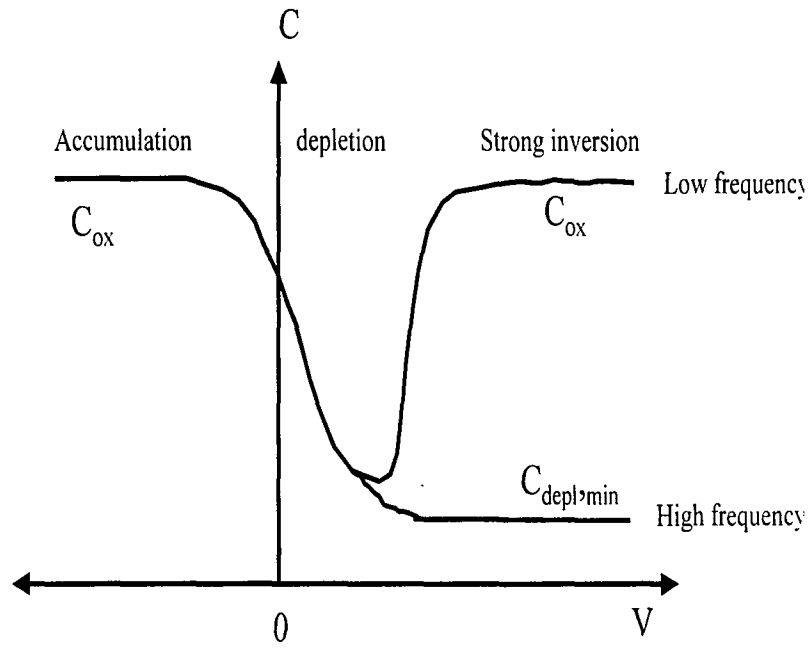


그림 3.6.2. 저주파와 고주파에서 C-V 특성

이제까지의 논의에서는 산화층 내부에 가둠 전하가 없고 반도체와의 계면에서도 가둠 전하가 없다는 가정을 하고 있었다. 만일 이들 두 가지 종류의 가둠 전하를 상정한다면 C-V 특성은 매우 달라진다.

산화층 전하는 게이트 전압의 함수가 아니므로, 특성 곡선의 모양은 바뀌지 않은 채 전하의 양과 부호에 따라 평행 이동을 하게 된다. 이 때 문턱전압(threshold voltage)의 이동은 $\Delta V_{FB} = -Q_{ox}/C_{ox}$ 만큼이다. 이 때 가둠 전하가 양전하일 때

는 왼쪽으로 음전하일 때는 오른쪽으로 이동한다.

반도체의 주기적 성질은 계면에서 갑작스럽게 끝나므로 허용된 에너지 상태는 금지된 띠(band-gap)내에 존재한다. 이들 에너지 상태를 계면상태(interface state)라 한다. 고정된 산화물 전하와는 달리, 계면전하는 반도체와 계면상태들 사이를 흘러간다. 계면상태의 알짜전하는 띠 내부에서 페르미 준위의 위치에 따른 함수로 주어진다. 일반적으로 받개(acceptor) 상태는 띠의 위쪽 반쪽에 있는 반면, 주개(donor) 상태는 띠의 아래 반쪽에 있다. 받개 상태는 페르미 준위보다 위에 있을 때 중립(neutral)이 되고, 페르미 준위보다 아래에 있을 때는 음전하가 쌓인다. 주개 상태는 페르미 준위보다 아래에 있을 때는 중립이고, 페르미 준위보다 위에 있을 때는 양전하가 쌓인다. 계면상태의 전하들은 따라서 MOS 축전기에 가해진 게이트 전압의 함수이다. 계면상태가 있는 한 계면에 붙잡힌 전하들의 양과 부호는 바뀐다. C-V 곡선은 그림 3.6.3과 같이 늘어난다.

3. 실험 장치와 SCM의 동작원리

SCM은 보통의 원자힘현미경(AFM)에 고감도의 전기용량 감지기와 전도성이 좋은 금속 탐침이 부가된 것이다. 가장 중요한 요소는 전도성 금속 탐침과 전기용량 감지기이다. 왜냐하면, 이들에 의해서 현미경의 공간적 분해능과 감도가 결정되기 때문이다. 탐침의 날카롭기 정도도 빼놓을 수 없는 요소이다. 이번 연구에서 이용된 전기용량 감지기는 RCA[Palmer 1982]에서 개발된 것과 유사한 PSI사의 비디오 디스크 전기용량 픽업 회로이다. 감도는 $10^{19}F$ 정도이다. 한편, 전도성 탐침으로 백금이 50 nm 정도 입혀진 원추형 실리콘 팁을 사용하였다. 실리콘 팁은 이미 $10^{19}-10^{20}/cm^3$ 밀도로 붕소가 고농도 첨가되어 있지만 백금막을 입힘으로써 더 좋은 특성을 기대할 수 있다.

그림 3.6.4는 SCM 장치의 개략도이다. 금속성의 탐침이 시료의 표면의 산화막에 접촉하고 있으며 이 자체가 MOS 구조를 이룬다. MOS 축전기는 절연성의 산화막과 산화막/실리콘 계면의 비움켜에 의한 두 가지 전기 축전기의 직렬 연결이다.

그림 3.6.5는 탐침과 반도체에 의해 형성된 MOS 축전기이다. 전체 전기용량은 산화막의 두께와 비움켜의 두께에 의해서 결정된다. 비움켜의 두께는 축전기에 인가된 직류 전압과 반도체 내부의 전하 밀도에 의존한다. 그래서 C-V 특성은 MOS 소자와 산화막-반도체 계면의 성질을 연구하는데 매우 중요한 정보를 준다.

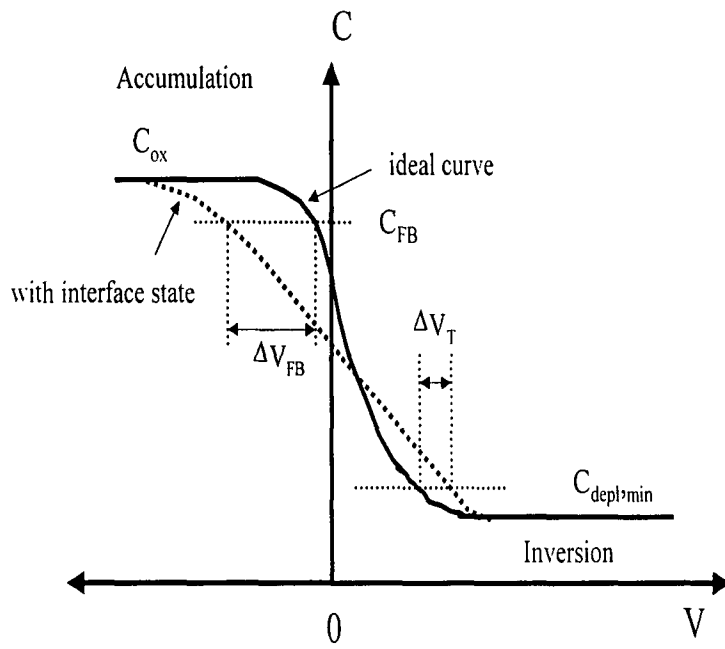


그림 3.6.3. 계면 상태가 존재할 때 그림과 같이 C-V 곡선은 늘어진다.

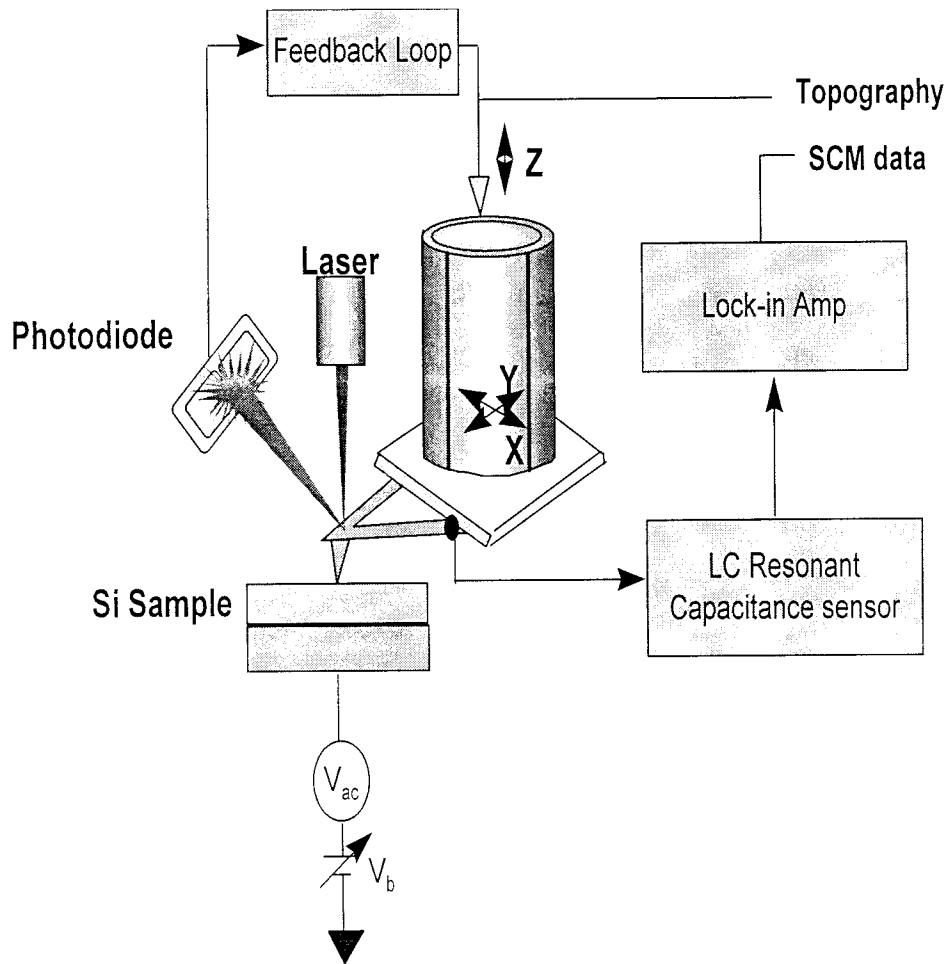


그림 3.6.4. SCM 장치의 개요도

MOS capacitor

Equivalent circuit

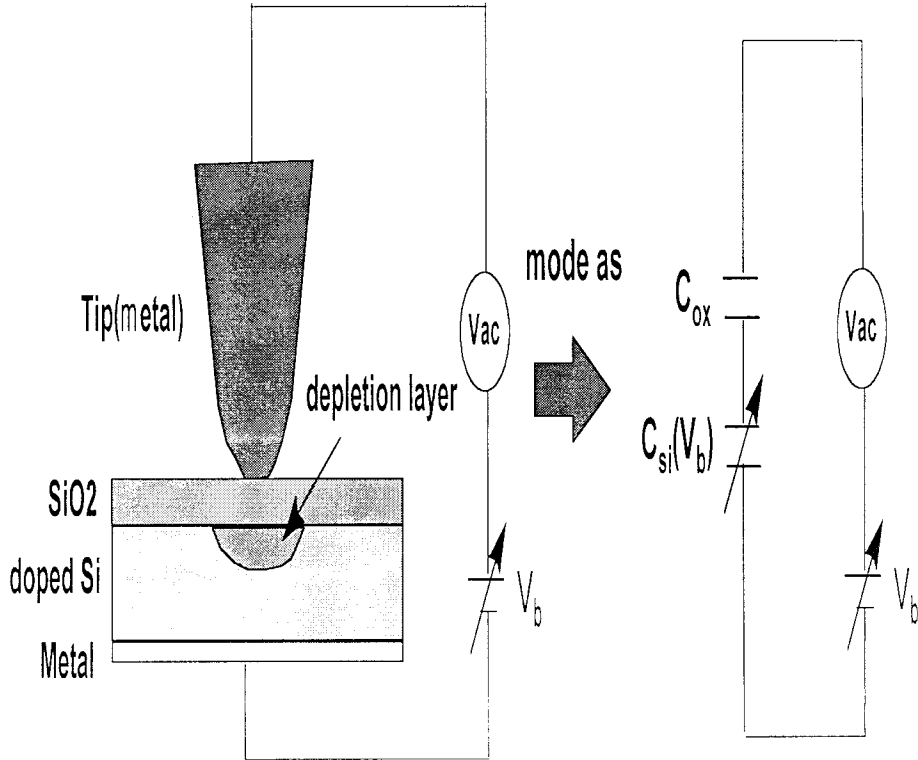


그림 3.6.5. 탐침과 절연층 그리고 반도체가 이루는 축전기 모형

이 연구에서 전기용량은 작은 교류 전압의 직류 성분에 없어서 전기용량의 미분값을 측정하는 방법으로 얻어졌다.

그림 3.6.6은 p형과 n형 반도체 시료에서 얻은 전형적인 C-V 곡선 그리고 전기용량 미분값-전압(dC/dV-V) 곡선이다. [Yamamoto 1997] 전하밀도가 낮을 수록 미분값은 더 두드러진 최고값(peak value)을 보여 준다. 인가된 직류 전압은 실리콘의 비움켜 너비를 변화시킨다. 덧붙여 교류 전압은 직류 전압이 고정되어 있을 때 비움켜 테두리의 위치를 변화시켜 전기용량의 미소 변화를 유도해낸다.

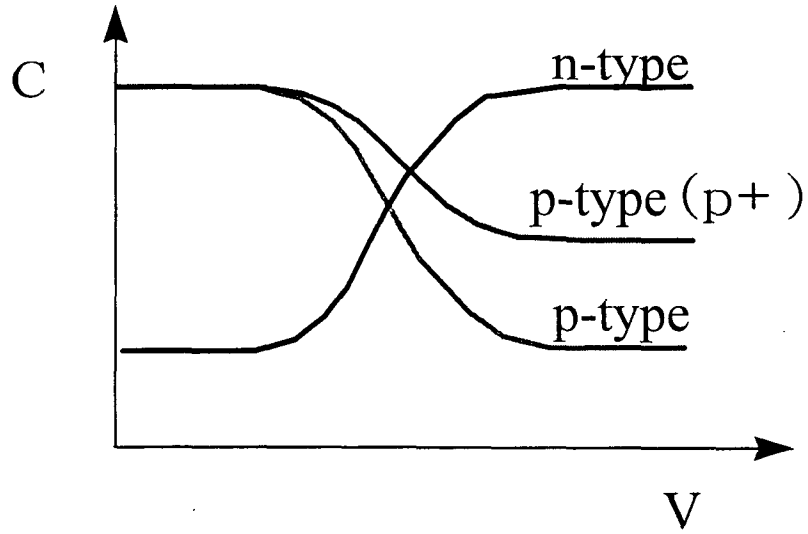
그림 3.6.7은 p형 반도체에서 전기용량의 미분값 dC/dV를 측정하는 방법의 개요이다. 직류 전압이 고정되어 있을 때 섞여 들어온 교류 전압은 전기용량의 변화를 유도한다. 위상맞춤증폭기(lock-in)는 인가된 교류 전압의 주파수 지점에서 크기와 위상의 변화를 측정해낸다. 따라서 증폭기의 출력은 전기용량에 비례하는 것이 아니라 C-V 곡선의 기울기에 비례한다. 따라서 증폭기의 출력은 전기용량의 미분값과 일치한다. SCM은 서로 다른 밀도로 불순물이 첨가된 영역 위를 누비며 이 미분값을 읽어낸다.

한편, 절연층에 붙잡힌 전하는 고주파 영역에서 C-V 곡선을 전압축을 따라 수평 이동시킨다. 따라서 국소전하의 분포도 전기용량 현미경으로 그려낼 수 있다.

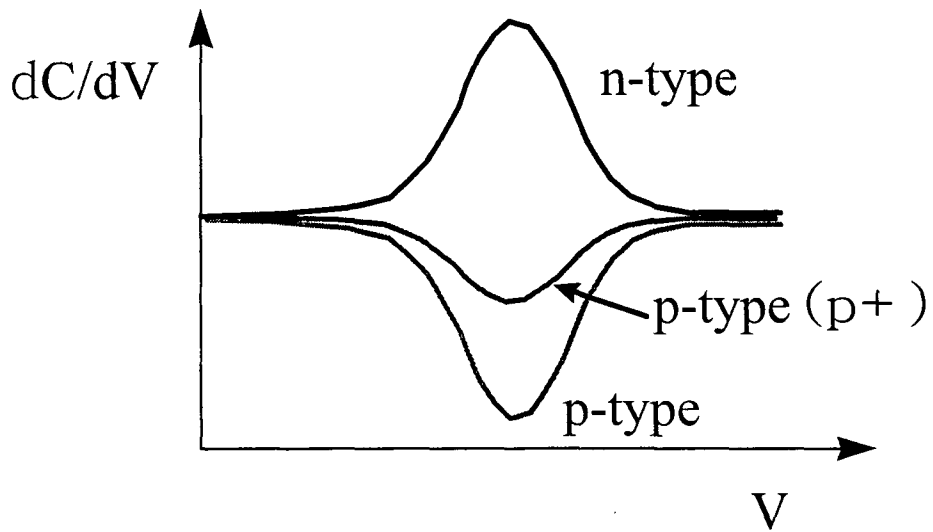
4. 불순물 분포도 측정(Dopant Profile Measurement)

SCM은 반도체에 첨가된 불순물 이온의 밀도를 2차원 상에 그림으로 표현하는데 널리 쓰이고 있다. 지금까지 이러한 측정을 위한 도구로서는 SIMS, SRP, 1차원 C-V 측정법등이 있었는데, 이 경우에는 정량적인 2차원 상의 정보를 얻기 위해선 이들이 측정해 얻은 1차원 데이터들을 취합하여 추정할 도리 밖엔 없었다. 반면, SCM은 매우 작은 크기 영역에서 나노미터 수준의 정확도로 2차원 상의 활성화된 전하들의 밀도를 쉽게 측정할 수 있는 잇점이 있다. 고정확도의 접합체 윤곽을 얻기 위해선 SCM의 측정 모형 개발과 해석이 똑같이 중요하다. [Kopanski 1996, Fischetti 1985]

SCM을 이용하여 불순물 분포도를 그려 내기 위해서 비소 이온(As⁺)으로 불균일하게 첨가된 p형 반도체 기판을 사용하였다. 불순물 이온의 유량은 $10^{14}/\text{cm}^2\text{sec}$ 이고 에너지는 50 keV이다. 기판의 비저항은 $0.2 \Omega\text{cm}$ 이다. 기판 웨이퍼는 $10^{19}/\text{cm}^3$ 로 붕소가 균일하게 첨가되어 있다. 그림 3.6.8은 반도체 표면의 높낮이와 SCM 영상이다. 밝은 부분은 70 nm의 높이로 길러진 산화실리콘 패턴이다. SCM은 표면에서 불순물 밀도와 산화층의 두께 변화를 보여 준다. 밝고 귀퉁이가 둥그스름한 직사각형 영상은 비소 이온이 많이 첨가된 부분을 가리킨다. 명암 대조는 교류 전압이 비움켜 영역에서 변화할 때 전기용량의 차이의 크기에 따라 달라 지는데, 명암 대조가 작다는 것은 두껍게 길러진 산화층 때문에 전기용량의 변화가 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 그러므로, 이 결과는 SCM이 절연층(산화막)의 상대적인 두께 차이를 영상으로 보여준 것이라 이해할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.6.6 전형적인 고주파 특성의 C-V 곡선 (a) dC/dV -V 곡선 (b) p형과 n형 반도체 경우의 곡선의 달라짐.

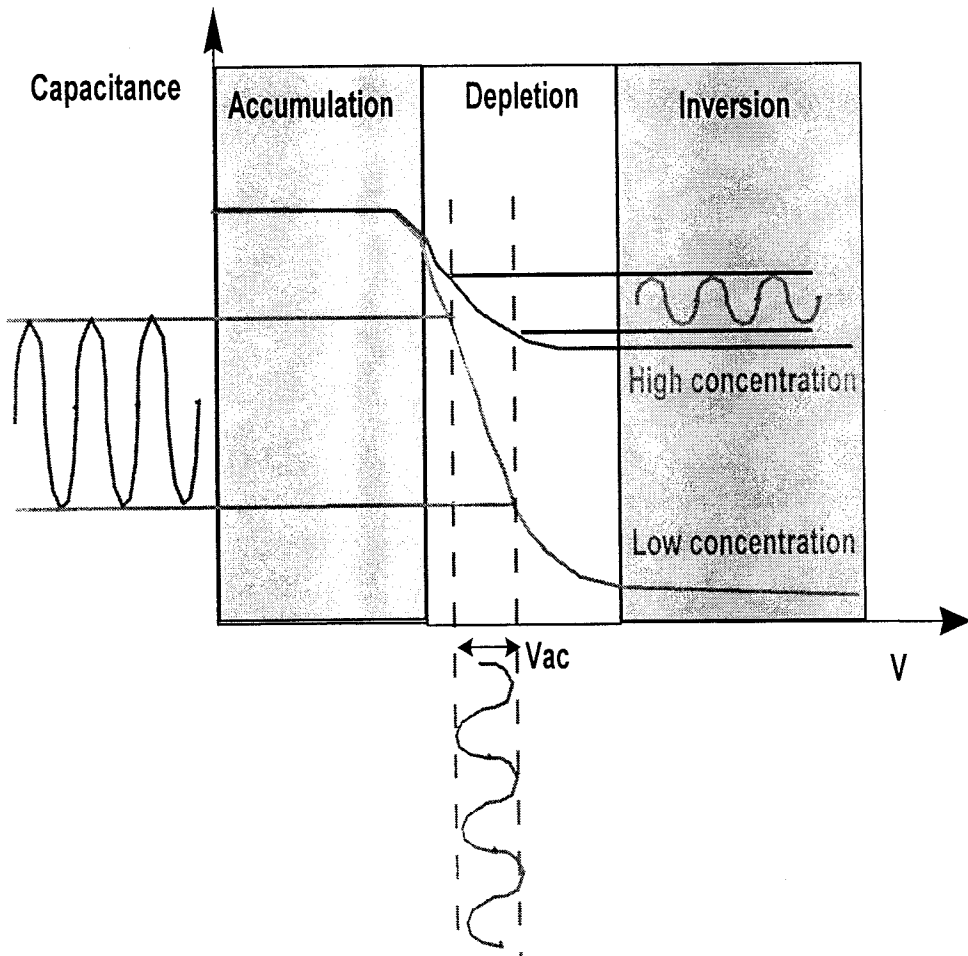
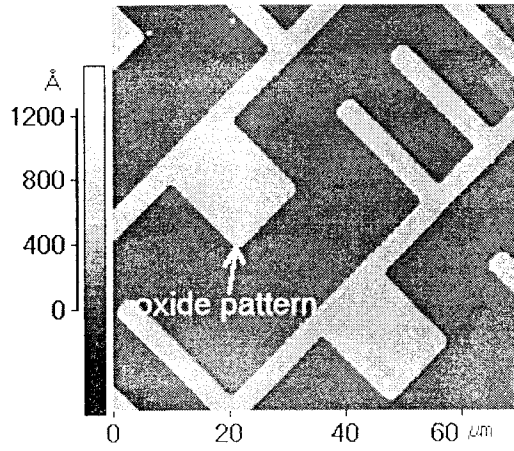
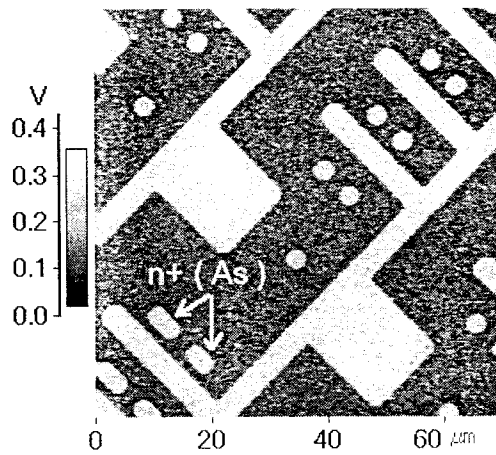


그림 3.6.7. 교류 전압을 가해주고 dC/dV 신호의 검출



(a)



(b)

그림 3.6.8. 불균일하게 첨가된 반도체 표면에서
(a) 높낮이 이미지와 (b) SCM 이미지

그림 3.6.9는 MOS 구조의 전계방출증폭기(MOSFET)의 (a)높낮이와 (b)2차원 불순물 첨가 분포도이다. 그림 3.6.9(c)는 3.6.9(b)에서 게이트 부근의 둘레 영상(contour map)이다. 고농도로 첨가된 소스(source), 드레인(drain) 그리고 접합부의 비움켜 영역은 SCM에 의해서 잘 영상으로 보여지고 있다. 이들의 높낮이 차이는 AFM의 측정에서도 보이질 않는다.

최근 Edwards 등의 연구에서는 pn 접합부에서 SCM 명암 대조 차이를 보여주고 있는데, 이것은 SCM이 pn 접합부처럼 매우 좁은 영역의 비움켜 특성을 연구할 수 있는 좋은 측정기기임을 의미한다. [Edwards 1998] 그림 3.6.10은 pn 접합부 근처에서 전압이 인가된 탐침에 의해 전하들이 반응하는 것을 모형화한 것이다. 평전압(flat-band voltage) V_{FB} 에서 탐침이 물박이 비움켜 영역(built-in depletion

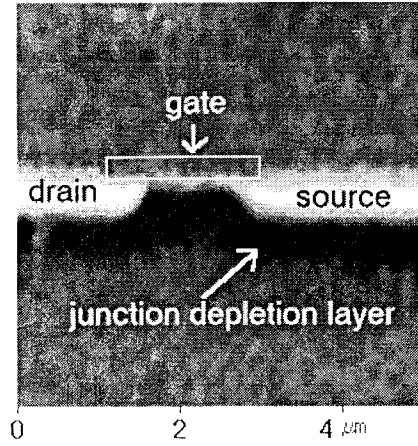
region)에 머무르고 있으면, 비움켜 테두리가 탐침으로부터 매우 먼 거리에 있기 때문에 탐침-시료간 전기용량은 매우 작다. 그러나, 탐침에 보다 높은 전압이 인가 되면, 탐침-시료간 전기용량은 C_{ox} 에 근접한다. 왜냐하면 탐침에 이끌린 전하들

과 반도체 내부에 저장된 전하들 사이에 교환이 일어나기 때문이다. 따라서, pn 접합 위에서 얻어진 전기용량-전압 곡선은 특정한 최저값을 가진다.

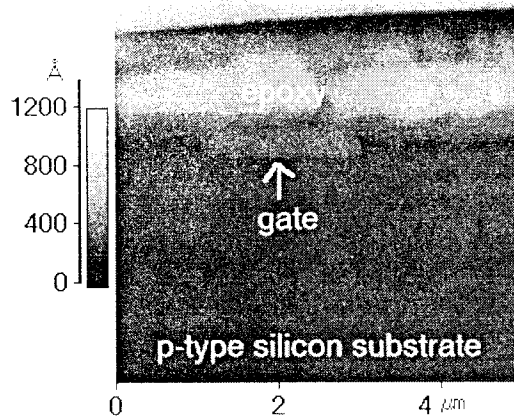
그림 3.6.11은 MOSFET 소자에서 다양한 탐침의 전압에 대한 SCM 영상이다. 결보기의 접합부 위치와 너비는 탐침의 전압을 높임에 따라서 움직이고 넓어진다. 게다가 탐침의 전압이 높아지면($> 0.5 V$), 탐침의 아래에 p 혹은 n 영역으로부터 다수 전하(majority carriers)의 전하 통로가 생겨난다. SCM의 이러한 유용성은 소자를 도안하고 특성을 재는데 매우 요긴하다.

5. 산화실리콘/실리콘 계에서 국소 전하가둠과 가둠 전하의 검출

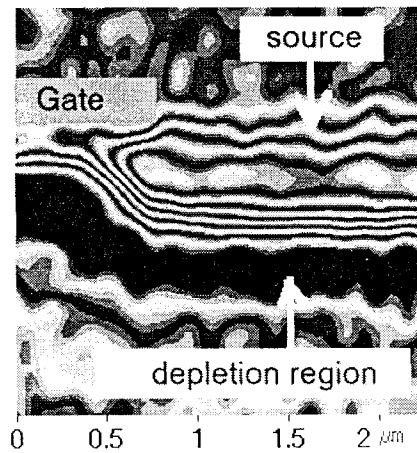
반도체 소자에서 전하가둠(charge trapping) 현상은 오랫동안 MOS 구조의 전자적 기능 저하를 이해하는 주된 요인으로 거론되어 왔다. 산화실리콘에 붙잡힌 전하는 MOS 소자의 불안정성과 고장의 주요한 원인들 중의 하나이다. 가령 Avalanche 효과와 고전기장 꿰뚫기, 광자주입 같은 다양한 전하주입방법은 MOS 소자에서 전하가둠으로부터 궁극적으로 기능저하가 일어나는 메카니즘으로 꾸준히 연구되어 왔다. Avalanche 주입이나 고전기장에 의해 생겨난 뜨거운 전하(hot carrier)들은 산화막을 뚫고 들어가 새로운 덩치 가둠(bulk trap), 계면 가둠(interface trap) 전하가 되거나 산화막 내부에서 전자-정공쌍을 만들어낸다. [Fischetti 1985, Trombetta 1991, Choi 1989] 그러므로 이 뜨거운 전자들은 소자의 특성을 변화시키거나 고장을 일으킨다. 한편, 뜨거운 전하들에 의한 전하가둠 현상은 역으로 비휘발성 메모리 소자에 이용될 가능성도 가지고 있다. 비휘발성 메모리 소자는 전하가둠을 일으키는 산화물 내부의 불순물들을 전하 저장의 수단으로 이용하고 있기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

그림 3.6.9. 전계방출증폭기(MOSFET)의 (a)높낮이와 (b)2차원 불순물 첨가 분포도
그림 3.6.9(c)는 3.6.9(b)에서 게이트 부근의 들레 영상

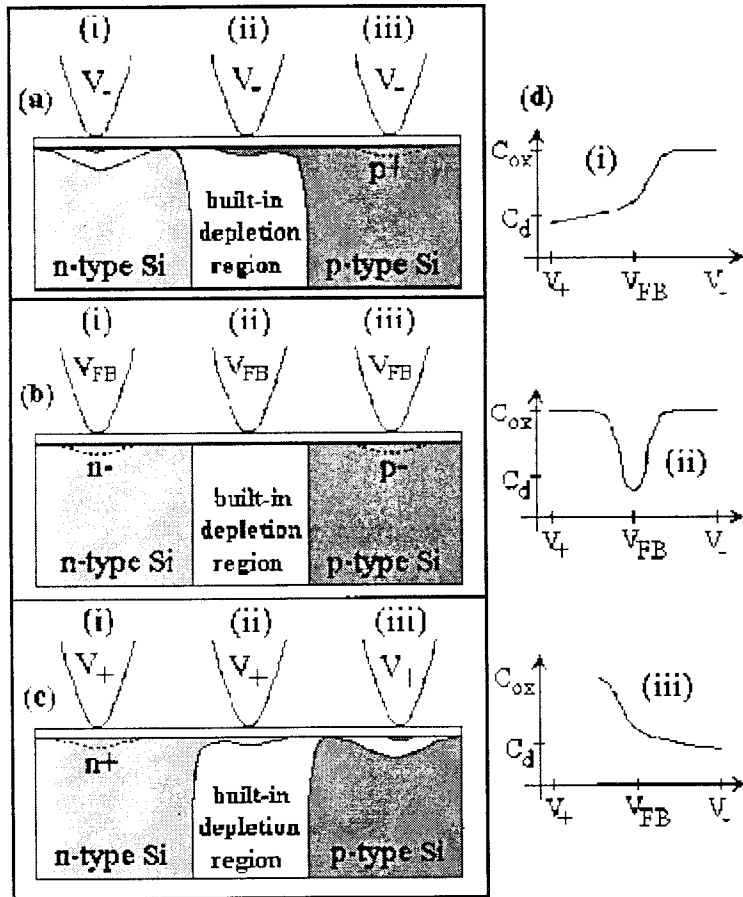
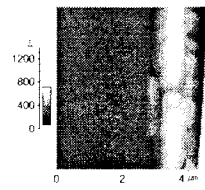
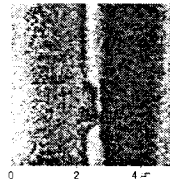


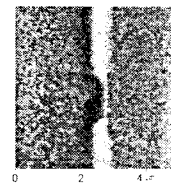
그림 3.6.10. pn 접합부 근처에서 전압이 인가된 탐침에 의해 전하들이 반응하는 것을 모형화



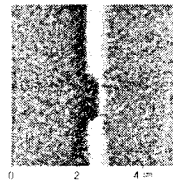
Topography



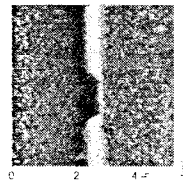
Tip bias = -0.3 V



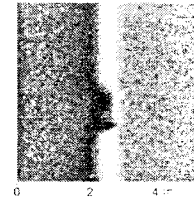
-0.2 V



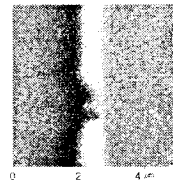
-0.1 V



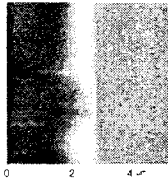
0 V



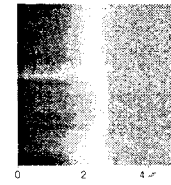
0.2 V



0.5 V



0.8 V



1.0 V

그림 3.6.11. MOSFET 소자에서 다양한 탐침의 전압에 대한 SCM 영상

SCM은 반도체 이성질체의 가둬진 전하분포를 그려 내는 방법으로서만이 아니라 국소 전하가둬짐을 일으키는 수단으로 사용될 수 있다. Barrett과 Quate는 SCM이 초고밀도의 비휘발성 기억장치로 이용될 수 있음을 보였다.[Barrett 1991, Barrett 1992] 또, 이러한 MOS 구조에서 전하가둬짐현상은 뜨거운 전자 주입과 꺾기 과정에 의해서 설명될 수 있다.[Itsumi 1981, Samanta 1998, Meinertzhagen 1996] 우선 우리는 전하가둬짐이 C-V 곡선에 어떤 영향을 미치는지 살펴 본다. 그런 다음, 가둬진 전하의 다양한 행동에 대해서 논의한다. 마지막으로 산화실리콘/실리콘 계가 초고농도 메모리 소자로 이용될 수 있는 가능성에 대해서 언급하고자 한다.

직류와 교류 전압이 C-V 특성을 재기 위해 탐침과 시료에 인가되었다. 위상맞춤 증폭기(lock-in amplifier)는 가둬진 전하나 활성화된 전하들에 의해서 영향을 받는 전기용량의 미분값(dC/dV)의 변화를 읽어 낸다. 여기에 이용된 시료는 비저항 $0.2 \sim 0.5 \Omega\text{cm}$ 의 p형 반도체이다. 실리콘 웨이퍼 전면에는 열적 성장법에 의해 산화막이 입혀져 있고 후면에는 금속 접합을 위해 알루미늄이 입혀져 있다.

산화실리콘/실리콘 계에서 전하가둬짐 과정을 이해하기 위해 뜨거운 전자 주입 방법이 쓰였다. 고전압의 펄스에 의해 MOS 축전기를 비움켜 상태로 물고 가면, 반도체 시료 표면의 공간 전하 지역에 고전기장이 걸리게 된다. 열적으로 흥분된 전하들이 이 지역에 흘러들면 전기장에 의해 가속되어 산화막에 충돌하고 결과물로서 전자-정공쌍이 산화층 내부에 생겨난다.

p형 반도체의 경우에 뜨거운 전하들은 게이트에 양의 부호의 전압 펄스를 인가함으로써 생겨난다. 비움켜 내부에서 가속되어 충분한 에너지를 얻은 전자들은 계면 에너지 장벽을 넘어 산화실리콘 내부로 들어가 전자-정공 쌍을 만들어낸다. 산화층 내부에 있는 불순물에 의해 붙잡히지 않은 전자들은 매우 빠르게(10^{-12} 초) 게이트로 빠져 나간다. 반면, 전자에 비해 이동성이 낮은 정공들은 느릿느릿(1초 이내) 산화실리콘/실리콘 계면으로 움직여 나가 계면 전하층(interface trap)을 이루거나 내부에 덩치 가둬진 전하(bulk-trap charge)가 된다. 따라서 산화막은 양으로 대전된 상태가 되는 것이다.[Fischetti 1985, Trombetta 1991, Itsumi 1981, B꺽다 1996, Barnes 1995]

그림 3.6.12(a)는 국소적으로 붙잡힌 전하의 SCM 영상이다. 영상을 얻는데 이용된 직류 전압은 $V_{dc} = 0 \text{ V}$ 이고 교류 전압의 꼭지점간 크기는 1 V 이며 주파수는 100 kHz 이다. 두 개의 밝은 지역은(A 그리고 B) 양으로 대전된 지역이다. 탐침이 일정한 직류 전압을 갖고 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 영역을 누비는 동안, 탐침 아래에 있는 실리콘 표면은 직류 전압의 극성과 크기에 따라 비움켜층을 형성하기도 하고 전하쌍임 층을 만들기도 한다. $+10 \text{ V}$ 의 전압이 탐침에 가해지면 뜨거운 전자들이 강한 비움켜 상태에서 산화층으로 주입이 된다. 또, -10V 의 전압이 탐침에 걸리면 정공들이 실리콘 표면에 층을 만들고 이때는 전체 전압이 산화층에만 걸리게 된다. 따라서 전자 주입은 Fowler-Nordheim 꺾기처럼 탐침으로부터 산화막쪽으로 꺾기 현상을 통해서만 일어난다.

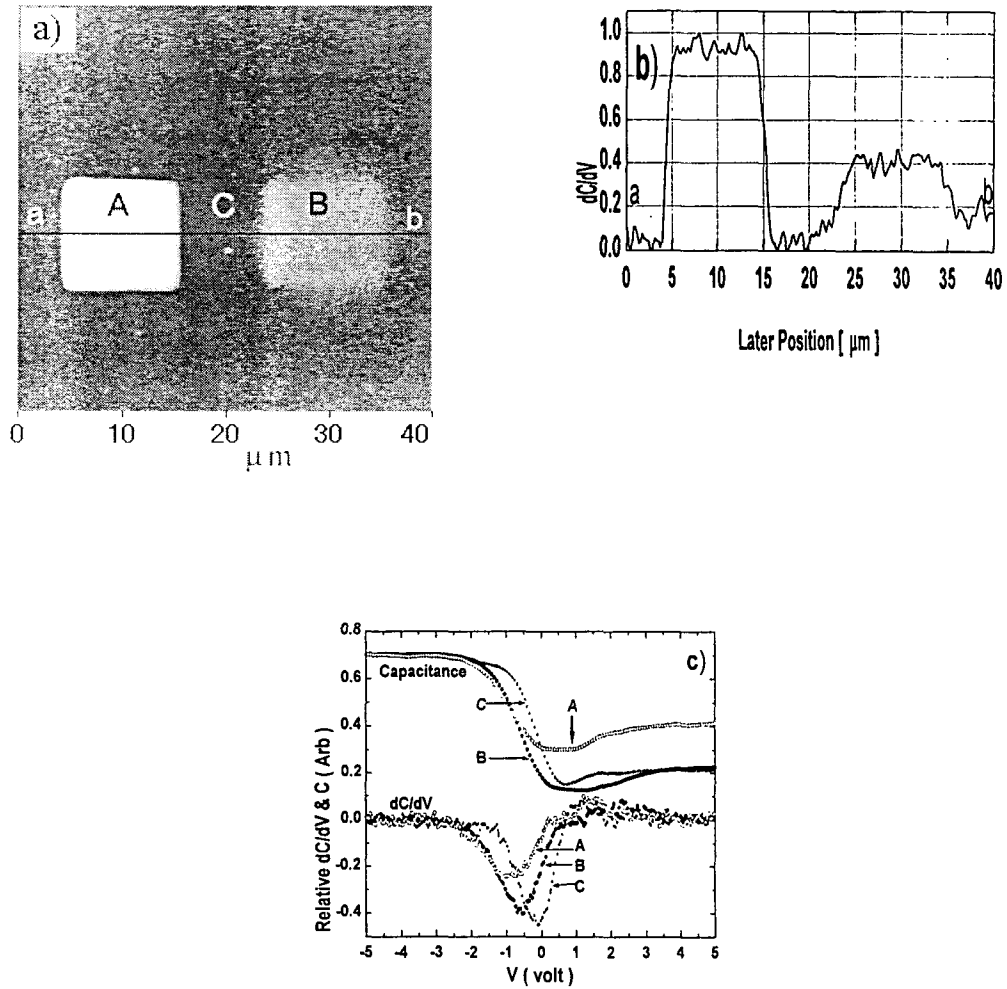


그림 3.6.12. (a) 상이한 주입법에 따라 생겨난 두 개의 양으로 대전된 지역 (b) A 지역은 10 V의 높은 전압에 유도된 뜨거운 전하에 의해 생겨난 가둬진 전하 지역이다. B 지역은 -10 V에서 꿰뚫기 과정에 의해 생겨난 지역이다. (b) a-b 선분을 따라 검출된 신호의 크기를 비교 (c) C-V 곡선은 dC/dV-V 곡선을 적분하여 얻어짐.

우리는 탐침의 극성에 관계없이 산화층에 최종적으로 붙잡힌 전하는 양의 부호를 가짐을 발견하였다. 이것은 아까 지적했듯이 전자의 유동성은 정공에 비해 월등히 크므로 전자는 전극쪽으로 빨리 빠져나가 버리기 때문이다. 그러나, 붙잡힌 전하의 양이나 중심점은 전극의 극성에 따라 달라질 수 있다. 이러한 양과 중심점의 차이는 모두 SCM 영상에 반영된다. 이들의 효과를 다른 요인의 기여도로부터 떼어놓는 것은 쉽지가 않다. 그림 3.6.12(b)는 게이트 전압이 0 V 일 때, a-b 선분을 따라 dC/dV 값들의 변화를 보여주고 있다. 세 가지 다른 지역(A, B, C)에서 명암 대조의 차이는 각 지역에서 dC/dV 값의 차이로 설명될 수 있다. 그림 3.6.12(c)에서 C-V 곡선들(위쪽 곡선들)은 아래쪽의 dC/dV 곡선들을 적분해서 얻어진 것이다. 0 V 일 때, dC/dV 값은 C지역에서 보다 A지역에서 더 큰 값을 갖는다. C 지역은 아무런 전하도 붙잡히지 않은 곳이다. 또 명암 대조에 영향을 미치는 또 한 가지 가능성은 산화막 두께의 차이이다. 그러나 이 측정에서는 산화막의 높낮이가 차이가 없음을 이미 확인하였다.

비록 산화막의 두께에 매우 작은 차이가 있다고 해도, 산화막에 붙잡힌 전하들에 의한 효과와 비교하면, 그 차이는 무시할만하다. 지역 A와 B에서 dC/dV의 최대 절대값은 지역 C에서 보다 작다. 만일 실리콘 표면에 전하뒤집힘 층이 형성되어 있다면 A지역과 B지역의 전기용량이 C지역의 그것보다는 크다. 이 뒤집힘 층때문에 교류 전류는 탐침의 단면적보다 몇배나 큰 영역을 흘러다니게 된다. 그러므로, 넓어진 단면적 때문에 부가된 전기용량이 매우 커지게 된다. [Nicollian 1982]

B지역에 붙잡힌 전하는 수십 분동안 느릿하게 확산한다. 그러나 A지역에 붙잡힌 전하는 며칠 이상의 매우 긴 생존시간을 갖고 있다. 우리는 이를동안 두고 보았으나 A지역의 영상에 아무런 변화도 읽을 수 없었다. A지역에 붙잡힌 전하는 평전압 $V_f=0.5$ V, 산화막 두께 10 nm에서 대략 $Q_{ot} = \Delta V_f C_{ox} = \Delta V_f \epsilon_{ox}/t_{ox} = 0.17 \mu\text{C}/\text{cm}^2 = 10^{12} \text{ e}/\text{cm}^2$ 일 것으로 계산되었다. 여기서 Q_{ot} , C_{ox} 그리고 ϵ_{ox} 는 각각 가둠 전하의 양, 산화막의 전기용량, 그리고 산화막의 유전 상수이다. 탐침의 기하학적인 모양이 완전한 평판이 아니기 때문에 추정된 값들은 어느 정도 실제로 언저리 효과까지 가미되어 붙잡힌 전하밀도보다는 작게 계산된다.

한편, 주입 시간에 따른 전하가둠 현상을 조사하기 위해서 다양한 누비기 속도에 따른 선형상들을 얻어내었다.(그림 3.6.13(a)). 이 경우, 주입시간은 누비는 시간에 역비례한다. 누비는 속도는 0.01, 0.1, 1, 10, 50 m/s 이며 인가된 전압은 +10 V 였다. 매우 느린 속도(0.01 m/s)로 쓰여진 선은 빠른 속도로 쓰여진 것들에 비해서 약간 더 밝고 넓은 선폭을 가졌다. 하지만 두드러진 차이를 보이지는 않는다. 그림 3.6.13(b)는 전압 펄스에 의해 점형상이 새겨진 모습이다. 각각의 원형 영역은 10 V 크기와 50 ms의 시간폭을 가진 전압 펄스에 의해서 만들어졌다. 점형상의 크기는 대략 300 nm이다. 점의 크기를 줄이기 위해선 고농도로 첨가된 실리콘 기판과 날카로운 탐침, 그리고 약하고 짧은 전압 펄스, 그리고 감도가 뛰어난 전기용량 감지기가 필요하다.

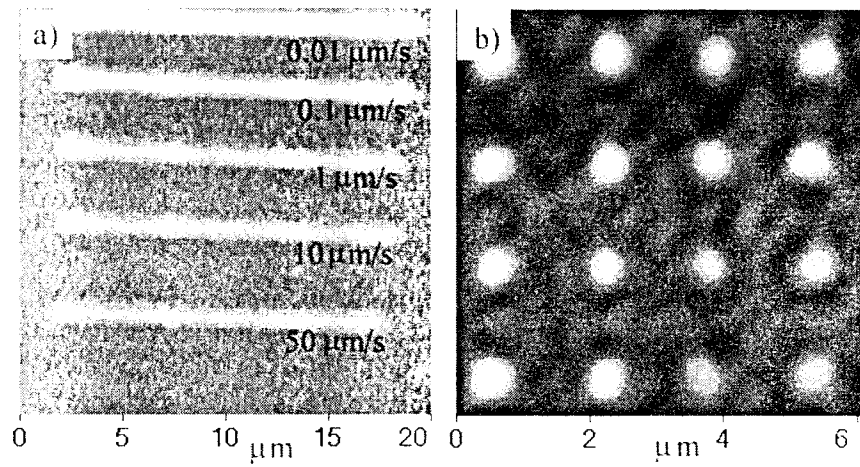


그림 3.6.13. (a) 10 V의 전압을 주고 다양한 속도로 선형상을 그렸다: 0.01 m/s, 0.1 m/s, 1m/s, 10 m/s, and 50 m/s. (b) 10 V, 50 ms의 펄스로 나타낸 점형상.

전하가들을 일으키는 문턱전압(threshold voltage)을 탐침의 전압을 선형적으로 증가시키며 속도 3 m/s로 일정하게 움직이며 측정해 보았다. 탐침의 전압은 그림 3.6.14에 표시되어 있듯 A지점에서 0 V, B지점에서 10 V까지 증가시켰다. 이 시료의 경우 대략 6 V 근처에서 선형상이 나타나기 시작함을 알 수 있다. SCM 영상에서 명암 대조의 전압 의존도는 전자-정공쌍의 생성이 뜨거운 전자의 에너지에 의존함을 암시한다. 문턱전압보다 높은 전압에서는 탐침끝 언저리 전기장에 의해 비움켜가 횡적으로 넓게 형성되므로 가둠전하들의 선평이 증가하게 된다.

마지막으로 쓰기 과정이 진행되는 동안, 탐침과 외팔보의 옆면에서 빠져나온 전기장의 효과를 조사해 보았다. 그림 3.6.15는 20분이내에 쓴 대학교 로고이다. 인가된 전압은 10 V이며, 쓰는 속도는 3 m/sec이다. 이 무늬는 354개의 벡터선으로 이루어져 있다. 그림 3.6.15(a)는 쓴 직후에 얻어진 영상이다. 희미한 배경 영상은 전기장의 빠져나옴 현상에 의한 것이다. 빠져나옴 전기장은 탐침의 끝에서 나오는 전기장에 비해 매우 약하기 때문에, 빠져나온 전기장에 의해 유도된 전하는 산화막 내부에 매우 얇은 층을 이룬다. 따라서 이들 전하의 생존시간은 탐침의 끝에서 나온 높은 전기장에 의해 산화막에 형성된 전하들보다는 매우 짧다. 처음의 배경 전하 구름은 영상을 계속 얻어감에 따라 사라져 가는데, 왜냐하면 전하 정보를 얻기 위해 인가된 약한 교류 전압이 산화막에 얇게 붙잡힌 전하들을 방출해 내보내기 때문이다. 따라서 영상을 몇 차례 얻는 동안 탐침의 끝에서 유도된 전기장에 의해 산화막 내부 깊숙이 붙잡힌 전하들만 남게 된다.(그림 3.6.15(b)) SCM 기술을 저장장치로 이용하기 위해서는 빠져나옴 효과를 극소화해야 한다. 그러기 위해서는 팁끝이 외팔보로부터 멀리 튀어나온 식각된 금속선이 이용된다. 또는 외팔보의 전도성 부분을 줄이거나 금속 물질을 덧입히고 이를 접지하여 옆면으로 전기장이 빠져나가는 것을 최대한 줄인다.[Yamamoto 1997] 만일 이 빠져나옴 효과를 줄이고 전기용량 감지기의 감도를 높일 수가 있다면, 산화실리콘/실리콘 계는 초고밀도의 기억 장치로서 유망한 후보가 될 수 있을 것이다.

결론적으로, 고전기장이 MOS 축전기에 가해지면, 탐침의 전압 부호에는 상관없이 실리콘 산화막에 양전하들이 붙잡힌다. 산화실리콘에 붙잡힌 전하는 전기용량 읽어내기 방법으로 분석하고 그림으로 나타낼 수 있다. 뜨거운 전자 주입 과정에 의해 생겨난 가둠전하는 고전기장 관통 과정에 의해 형성된 것보다 훨씬 더 긴 생존시간을 갖는다. 뜨거운 전자 주입시간은 쓰기 공정에선 중요한 인자는 아니다. 옆면이나 외팔보에 의해 빠져나간 전기장은 계면이나 아주 얇은 곳에 가둠전하를 만들어낸다. 이들 계면상 전하나 혹은 얇게 묻힌 전하들은 영상을 얻는 동안 탐침의 교류 전압에 의해 탈출해 나가므로 쉽게 지워질 수 있다. 하지만 탐침의 예리한 끝에 의해서 깊게 파묻힌 전하들은 교류 전압에 의해서 지워지지 않는다.

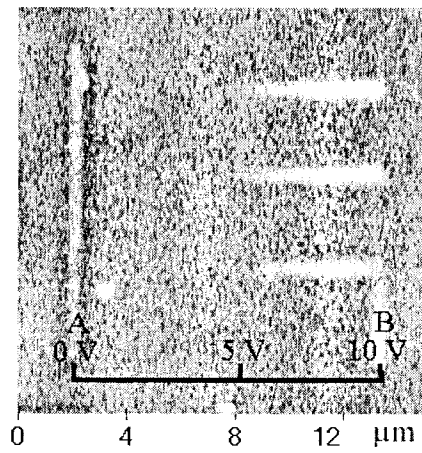


그림 3.6.14. 탐침의 전압을 A지점에서 0 V, B지점에서 10 V까지 증가시켰다. 이 시료의 경우 대략 6 V 근처에서 선형상이 나타나기 시작함을 알 수 있다.

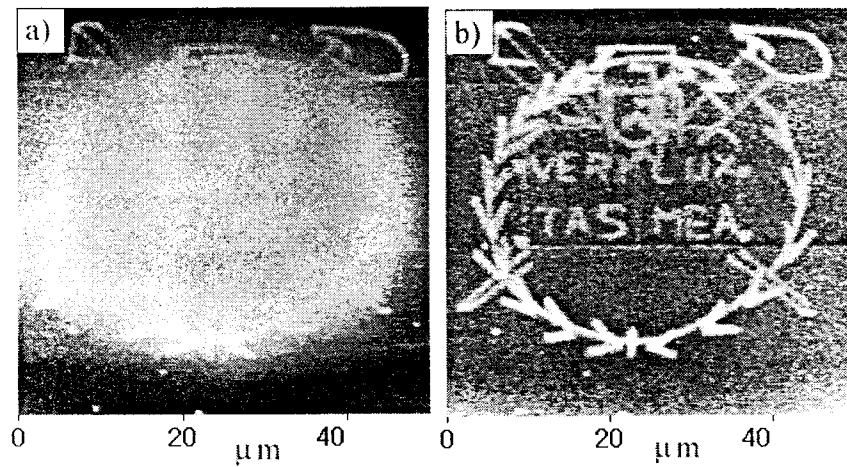


그림 3.6.15. 대학교 로고. 인가된 전압은 10 V이며, 쓰는 속도는 3 m/sec이다. 이 무늬는 354개의 벡터선으로 이루어져 있다. (a) 쓴 직후에 얻어진 영상. 빠져나온 전기장에 의해 배경이 약하게 전하가들 상태를 띤다. (b) 약한 교류 전압으로 영상을 얻는 동안 산화막 내부 깊숙이 붙잡힌 전하들만 남는다.

6. 결론

이상에서 보았듯이 전기용량현미경(SCM)을 이용하여 반도체의 특성을 분석하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 특히 MOSFET 소자의 2차원적 불순물 분포를 측정하였다. 또한 SCM을 이용하여 산화실리콘/실리콘 계에 국소적으로 전하를 가두고 이를 비휘발성 메모리로 이용할 수 있는 가능성에 대해서 논의하였다. 산화실리콘/실리콘 계는 반도체 공정에서 가장 흔하고 그리고 손쉽게 얻어지는 매체이므로, 앞에서 언급한대로 탐침끝이 아닌 부분에서 방출되는 전기장에 의한 효과를 줄인다고 밀도 기록 매체로서 유망한 후보로 기대할 수 있다. 지금 탐침의 기하학적 구조를 바꾸거나 박막을 입혀 전기장이 빠져나오는 효과를 극소화할 수 있는 연구가 진행중에 있다.

제 7 절 압저항(Piezoresistive) 외팔보를 이용한 전기힘 현미경의 개발

보통의 전기힘 현미경은 외팔보의 휨에 대한 정보를 외팔보에 의해서 반사된 레이저 빛의 각도를 측정해서 얻기 때문에 시스템이 크고 복잡해진다. 또 매번 탐침을 갈아 끼울 때마다 레이저 빔이 외팔보에 맞도록 조정해 주어야 한다. 이러한 복잡성 때문에 진공이나 저온에서는 레이저를 이용한 측정방법이 매우 어렵다.

최근에 탐침 현미경을 미세패턴의 제작에 응용하고 있다. 그러나 탐침 현미경에 의한 미세 패턴 제작은 한 개의 탐침을 scan 하는 방식이기 때문에 속도가 너무 느린 단점이 있다. 따라서 제작 속도를 증가시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있는데 가장 주목 받고 있는 것이 수십 개의 탐침을 배열하여 패턴을 제작하는 것이다. 이 경우 한번의 scan 으로 한 배열에 있는 탐침의 개수만큼의 패턴이 제작되므로 속도는 탐침의 개수에 비례하게 된다. 그러나 레이저를 이용한 측정방법은 배열에 있는 탐침과 같은 수의 레이저가 필요하기 때문에 시스템이 너무 크고 복잡해져서 현실적으로 적용 불가능하다.

레이저를 사용하지 않고 외팔보의 휨을 측정할 수 있는 방법이 필요한데 이를 해결하기 위해 최근에 대두되고 있는 것이 실리콘의 압저항 특성을 이용하여 외팔보의 휨을 측정하는 방식이다. 압저항 소자는 가해지는 압력이 변하면 저항 값이 변하는 특성을 지닌 소자이다. 적당히 도핑이 된 실리콘은 이런 특성을 지니고 있는데 이것을 이용하여 외팔보를 제작하면 저항을 전기적으로 측정해서 외팔보의 휨을 측정할 수 있다. 전기적 저항을 측정하는 것은 외팔보의 양단에 전극만 나 있으면 되므로 별도의 부속이 필요하지 않다.

압저항 외팔보를 이용한 탐침 현미경은 매번 레이저가 외팔보에 맞도록 조정할 필요가 없기 때문에 진공이나 저온 등에서 아주 쉽게 사용할 수 있다. 또 레이저에 의한 측정방법에서는 불가능했던 배열 형태의 탐침에도 쉽게 적용할 수 있다. 따라서 탐침 배열을 이용하여 빠른 패턴 제작을 할 때에는 압저항 외팔보를 사용하는데 최근에는 50 개의 압저항

외팔보를 한 줄로 배열하여 각각의 외팔보를 독립적으로 조정하면서 미세 패턴을 제작했다는 보고가 있다.

그러나 지금까지 압저항 외팔보는 시료의 topography를 보는 데에만 주로 쓰였고 정전기 힘의 정보를 얻는데는 사용된 적이 없다. 5절의 내용에서 보듯이 전기힘 현미경은 강유전체 물질과 함께 사용되면 강유전성 구역의 극성을 수십 nm 크기로 조정할 수 있으므로 초고밀도 정보 저장 장치로 응용 될 수 있다. 따라서 만약에 압저항 외팔보를 정전기힘 현미경에 적용하는 것이 가능해서 압저항 외팔보를 배열형태로 만들어 강유전체의 극성을 빠르게 읽고 쓸 수 있다면 고속으로 초고밀도로 저장된 정보를 읽고 쓸 수 있는 정보 저장 장치를 제작할 수 있게된다. 그 뿐만 아니라 고진공이라든가 저온처럼 레이저에 의한 측정이 힘든 환경에서도 쉽게 시료의 정전기힘의 정보를 얻어낼 수 있는 장점이 있다.

이렇게 다양하게 쓰일 수 있는 압저항 외팔보를 전기힘 현미경에 적용하려는 시도는 여태껏 없었다. 이는 압저항 외팔보의 전기저항을 측정하기 위해 전압을 주기 때문에 이러한 전압 신호가 탐침과 시료 사이의 전기힘을 측정하는데 방해가 되기 때문이었다. 본 연구에서는 압저항 외팔보를 정전기힘 현미경에 적용할 수 있는 방법에 대해서 설명하고 그 결과를 기술할 것이다.

1. 압저항 외팔보의 정전기적 진동에 대한 특성

전기힘 현미경이 되기 위해서는 5 절에서 이야기했듯이 탐침과 시료 사이에 정전기적인 진동이 있어야 한다. 따라서 탐침과 시료 사이에 AC 전압을 가해주어야 한다. 그림 3-7-1에서 보듯이 압저항 외팔보의 경우에는 탐침에 가해지는 전압이 외팔보의 저항을 측정하기 위한 다리회로(bridge circuit)에 의해서 2.5V 로 자동적으로 가해진다. 따라서 탐침과 시료사이에 전압 차를 조정하고자 할 경우에는 시료에 가해주는 전압으로 조정해야 한다. 그림 3-7-1 에서처럼 시료에 AC 전압과 DC 전압을 합해서 가해주었다. 여기서의 AC 전압은 탐침과 시료 사이의 정전기력을 진동시키기 위한 것이고 DC 전압은 주로 탐침과 시료 사이의 전위차를 nulling 시키는데 사용되었다.

압저항 외팔보로 정전기힘 현미경이 가능한지 확인하기 위해 그림 3-7-1 과 같은 장치에서 시료에 가해지는 DC 전압을 바꿔가며 외팔보의 진동 특성을 분석했다. 이 경우에 탐침과 시료 사이에 작용하는 힘은 식 3.7.1과 같다.

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_s - V_t)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} - V_t + V_{ac} \sin \omega t)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} ((V_{dc} - V_t)^2 + \frac{1}{2} V_{ac}^2 + 2(V_{dc} - V_t)V_{ac} \sin \omega t - \frac{1}{2} V_{ac}^2 \cos 2\omega t) \\
 &= F_{dc}(t) + F_{\omega}(t) + F_{2\omega}(t)
 \end{aligned}$$

where

$$F_{dc}(t) = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} ((V_{dc} - V_t)^2 + \frac{1}{2} V_{ac}^2)$$

$$F_{\omega}(t) = \frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} - V_t) V_{ac} \sin \omega t$$

$$F_{2\omega}(t) = -\frac{1}{4} \frac{\partial C}{\partial z} \frac{1}{2} V_{ac}^2 \cos 2\omega t$$

(3.7.1)

여기서 $F_{\omega}(t)$ 는 가해주는 AC 전압과 같은 주파수로 진동하는 힘의 성분이고 $F_{2\omega}(t)$ 는 두 배의 주파수로 진동하는 힘의 성분이다. 이 식의 $F_{\omega}(t)$ 성분을 보면 시료의 전압 V_{dc} 에 비례함을 그리고 $F_{2\omega}(t)$ 는 V_{ac} 의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 이러한 힘들의 진동 주파수와 같은 주파수로 탐침이 진동하게 되므로 탐침 진동의 ω 성분은 시료 표면의 전위 V_{dc} 에 비례하게 된다. 따라서 시료표면의 전위를 측정하고자 하면 탐침 진동의 ω 성분을 측정하면 된다. 그림 3-7-2 는 시료의 전위 V_{dc} 를 바깥쪽에 따라 압저항 외팔보의 저항 변화의 ω 성분을 측정한 것이다. 외팔보의 공명 주파수는 80kHz 였고 가해주는 AC 전압은 5V, 20kHz 였다. 그림에서 볼 수 있듯이 가해주는 AC 전압과 같은 위상의 신호와 90° 차이 나는 위상의 신호를 측정하였다. 그런데 결과를 통해서 알 수 있듯이 90° 차이 나는 위상의 신호가 10 배가량 크다. 이것은 식 3.7.1 의 $F_{\omega}(t)$ 가 가해주는 AC 전압과 동일한 위상의 성분만을 갖고 있고 또 측정하는 주파수 (20kHz)가 외팔보의 공명 주파수 80kHz 보다 훨씬 낮아서 탐침의 진동이 $F_{\omega}(t)$ 와 같은 위상이라는 점을 감안 할 때 이상한 결과이다. 이는 외팔보 진동의 측정방법이 전기적인 방법에 의한 것이어서 시료에 가한 AC 전압이 시료와 탐침사이의 전기들을 타고 들어오는 것으로 생각된다. 측정기에 의해 위상이 90° 바뀌므로 측정되는 값은 위상이 90° 가 바뀌게 된다. 그러나 이러한 성분은 외팔보가 실제로 진동하는 것에 의한 것이 아니라 시료에 가한 AC 전압이 전기들을 타고 그대로 들어오는 것이므로 시료의 DC 전압 V_{dc} 와는 무관하다. 따라서 그림 3-7-2(a)에서 보듯이 그 신호의 크기는 크지만 V_{dc} 에 따른 변화는 거의 없다. 따라서 이러한 신호는 제외시키고 실제로 탐침이 진동하는 신호인 동일위상 성분만을 뽑아내어야 한다. 위상맞춤 증폭기를 사용하면 동일 위상의 신호만을 뽑아낼 수 있으므로 가능하다. 이것이 압저항 외팔보를 전기힘 현미경에 사용할 때 유의해야 할 점이다. 탐침 진동의 2ω 성분이 시료의 AC 전압의 크기의 제곱에 비례하는 지를 확인하기 위해서 시료의 AC 전압을 바꾸어가며 탐침 진동의 동일 위상 ω 성분과 2ω 성분을 측정하였다. 그 결과가 그림 3-7-2(b) 에 나타나 있다. 2ω 성분의 크기의 제곱근이 가해주는 AC 전압의 크기에 비례하므로 이론에 잘 맞는 것이 확인되었다.

2. 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경으로 TGS 의 강유전성 구역 관찰

압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경을 강유전체 물질의 강유전성 구역 관찰에 이용해 보았다. 측정 방법은 앞 절에서도 이야기했듯이 시료에 5V, 20 kHz 의 전압을 주고 동일 위상의 20kHz 성분의 외팔보 저항값 변화를 측정하였다. 두드리기 모드와 동적 접촉식 모드로 TGS 의 강유전성 구역을 관찰하였다. 그 결과가 그림 3-7-3 에 나와 있다 (a)가 두드리기 모드에 의한 것이고 (b)는 동적 접촉식 모드에 의한 것이다. 동적 접촉식 모드에 의한 이미지에서 강유전성 구역의 벽이 훨씬 더 잘 정의됨을 볼 수 있다.

비록 레이저에 의한 측정방법 보다는 노이즈가 있지만 쓰기 편하고 저온이나 진공 같은 환경에서도 쉽게 적용가능하기 때문에 응용 범위가 넓다.

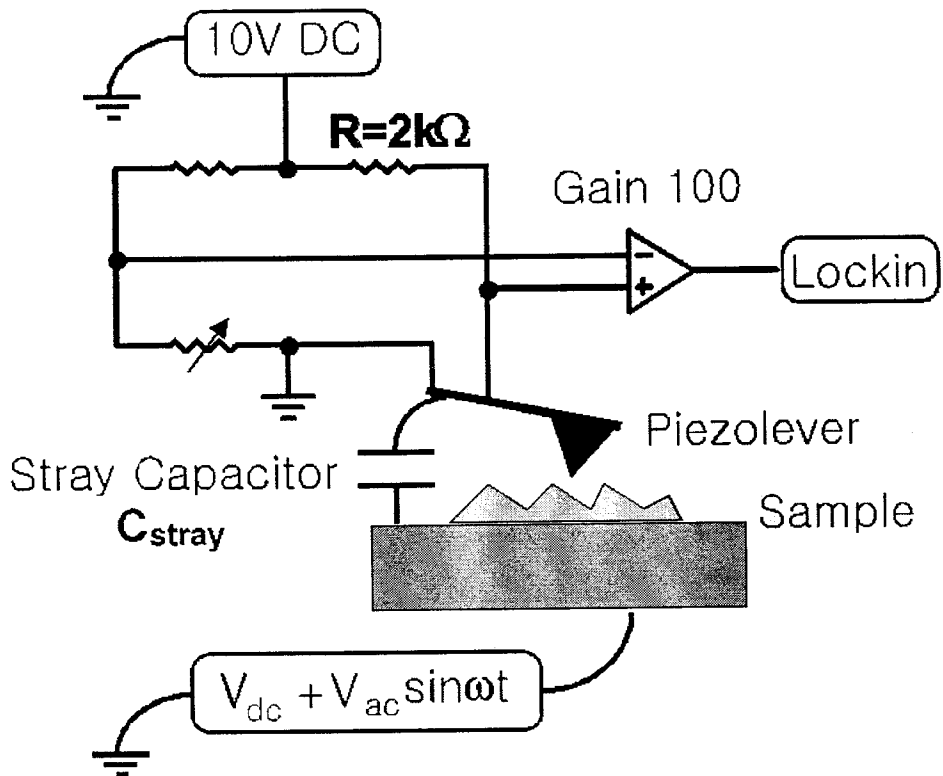


그림 3-7-1 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경의 개략도

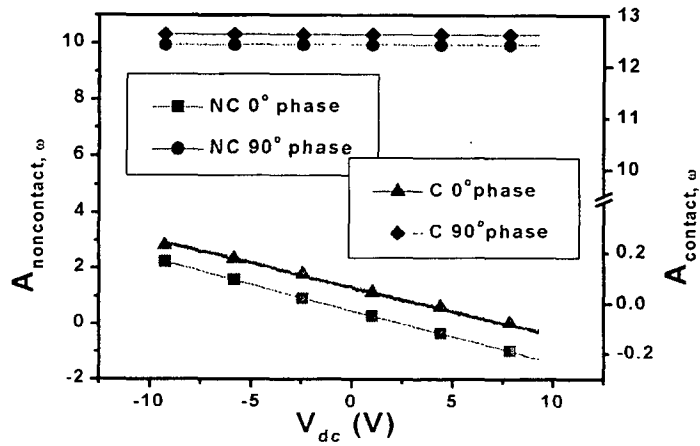


그림 3-7-2(a) 시료의 전위 V_{dc} 의 변화와 그에 따른 압저항 외팔보의 저항 변화의 ω 성분 사이의 관계

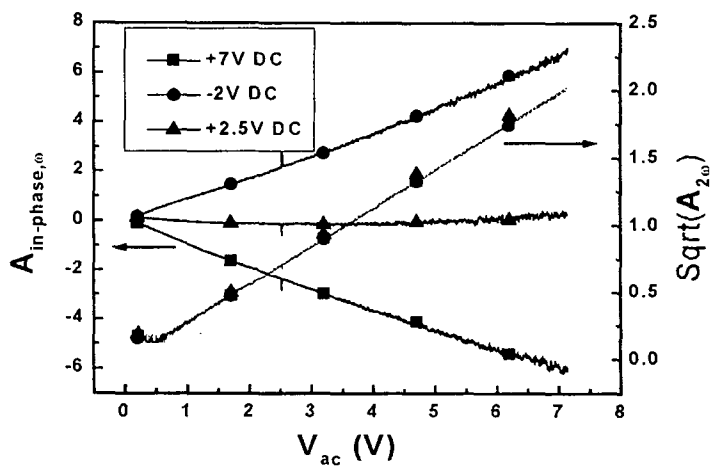


그림 3-7-2(b) 시료의 AC 전압의 크기의 변화에 대한 압저항 외팔보의 저항값의 변화

3. 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경으로 PZT 박막의 강유전성 구역 패턴

전기힘 현미경으로 탐침과 시료 사이에 수 V 의 전압만 가해도 전기장은 크기 때문에 강유전체 PZT 박막의 팽창 전기장의 크기보다 클 수 있다. 따라서 탐침과 시료 사이에 적절한 전압을 가해서 PZT 박막의 극성을 수십 nm 크기 정도로 조정할 수 있다. 그리고 이러한 특성을 초고밀도 정보 저장장치로 응용하려는 연구가 최근에 주목받고 있다. 그런데 앞에서 이야기했던 것처럼 압저항 외팔보를 이용하여 탐침들을 배열의 형태로 만들면 훨씬

빠른 속도로 정보를 저장 또는 읽을 수 있게 된다. 여기서는 이러한 가능성을 테스트하는 첫 단계로서 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경으로 PZT 박막에 패턴을 제작하고 읽을 수 있는지의 여부에 대해서 연구하였다. 시료는 sol gel 방법으로 Pt 전극 위에 입혀진 PZT 박막이었다. 우선 -80 V 의 전압을 이 시료에 가해서 강유전성 극성을 한 쪽 방향으로 정렬 시킨 후 시료에 0V 부터 30 V 까지 가해면서 선을 그었다. 그 결과가 그림 3-7-4 에 나타나 있다. 동적 접촉 모드를 사용하여 이미지 했다. 그림 (a)는 패턴을 그린 후의 topography 이며 (b)는 전기힘 현미경 이미지이다. 두 이미지는 동적 접촉 모드를 사용하여 동시에 얻어진 것이다. 5V부터 선이 보이기 시작함을 알 수 있다. (a) 에서는 제작된 패턴이 보이지 않고 (b) 에서만 보이므로 제작된 패턴은 시료의 topography 가 바뀐 것이 아니라 강유전성 극성이 바뀐 것으로 볼 수 있다.

결론적으로 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경으로도 PZT 박막에 패턴을 제작하고 읽을 수 있다는 것이 확인되었고 따라서 압저항 외팔보를 배열 만든다면 초고속 초고밀도 정보 저장 장치로 응용이 가능하게 될 것이다.

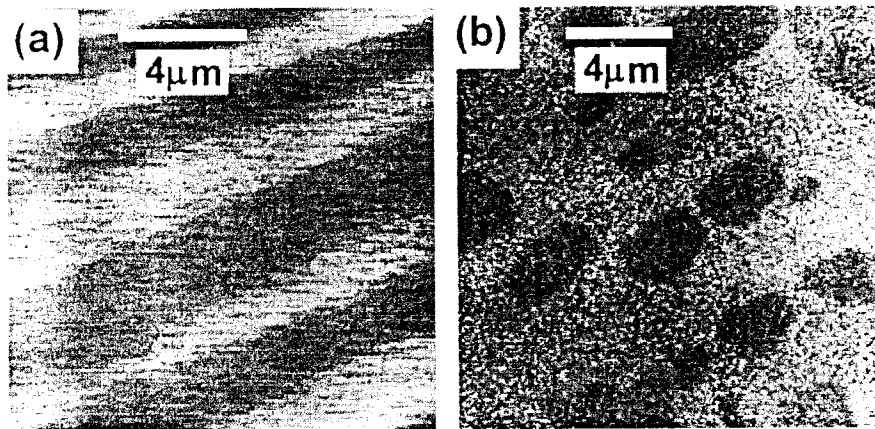


그림 3-7-3 압저항 외팔보를 이용한 전기힘 현미경으로 관찰한 TGS 강 유전성 구역. (a)는 두드리기 모드로 본 것이고 (b)는 동적 접촉 모드로 본 것이다.

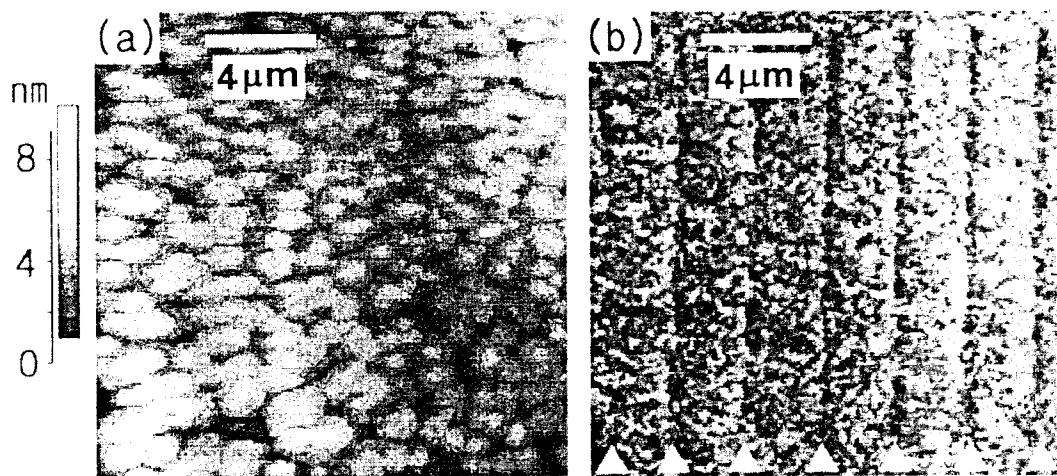


그림 3-7-4 PZT 박막에 -80V를 가해 강유전성 극성을 한 쪽 방향으로 정렬 시킨 후 다시 0V 부터 30 V 까지 가하면서 선을 그었다. (a)는 선을 그은후 topography를 본 것이고 (b)는 전기힘 현미경 이미지이다.

제 8 절 AFM Lithography

1. SPM 계열의 STM와 AFM의 기본이론

SPM계열의 일종으로 STM과 AFM은 시료의 topography, friction, adhesion, deformation의 연구에 주로 사용되어 왔다. [Albrecht, 1987] STM은 날카로운 전도성 tip을 이용하여 시료의 표면을 연구하는 것으로 tip을 시료와 10Å 간격을 유지시킨 후 전압을 인가하여 시료와 tip사이에 전자의 "tunnel"효과를 이용하여 시료의 표면을 측정하게 된다. 이때 형성되는 전류는 시료표면의 두께와 거리에 따라 형성되는 전류의 차이를 보이게 된다. STM의 경우 "tunnel"효과를 위해서는 시료가 반드시 도체이거나 반도체이어야 하는 한계성을 보인다. 반면에 AFM은 원자간의 반데르발스 힘, 즉 인력과 척력을 이용한다. 이런 시료와 Tip의 원자간의 미세한 힘의 변화에 따라 시료의 표면을 scan하면서 시료의 표면을 측정하게 된다. [Binnig, 1986]

최근에는 STM와 AFM의 응용의 한 분야로써 nano-scale의 lithography기술에 널리 연구되어 오고 있고, 또한 다양한 방법으로 초기의 결과물을 얻고 있다. [Nagahara, 1995] 위의 연구방법으로 resist 물질을 이용하는 방법 [Marrian, 1994][Day, 1993], Oxidation을 통한 방법[Rosolen, 1993][Enachescu, 1994] 가스분위기에서의 deposition에 의한 방법[Thibaudau, 1994]등 많은 연구 방법이 있다.

resist 물질을 이용한 방법의 경우에는 SAL-601 [Marrian, 1992][Marrian, 1991a]과 P4BCMU resist[Marrian, 1991b], polymethylmethacrylate(PMMA) resist 등을 사용하여 pattern을 형성한 것이 보고되고 있으며 SOG를 이용한 lithography도 보고한 바있다. [Majumdar, 1992][Mamin, 1992] 그리고 또 다른 방법으로는 수소 passivation된 Si 표면 위에 공기 중에서 금속이 coating된 AFM tip을 이용하여 국부적인 전계를 이용하여 poly Si이나 Ti의 pattern을 형성하는 방법도 보고되고 있다. [Snow, 1994][Snow, 1993][Wang, 1994] 이러한 oxide pattern은 비록 몇 monolayer의 얇은 두께일지라도 Si oxide뿐만아니라 Si에 부착되어 매우 강인한 mask의 형태로 selectivity를 갖는다.

스탠포드 대학의 Quate 교수의 연구팀은 광학lithography기술로 MOSFET의 active region을 형성하고 Gate를 AFM을 이용하여 만드는 "Mix and match" 방법으로 MOSFET의 특성을 얻어내는데 성공하였다. [Minne, 1995]

STM을 이용한 lithography기술 방법은 AFM에 비해 터널링 효과가 뛰어난 이점이 있지만 STM이 시료의 표면을 연구하는 과정에 의해 resist의 화학적 변형을 일으킬 수 있다는 단점과 시료와 Tip사이의 간격을 고정하게 됨으로 시료의 거칠기가 클 경우 시료의 손상과 더불어 Tip의 손상을 일으킬 수 있다는 단점을 지니고 있다. 반면에 AFM은 Tip과 시료사이의 거리를 일정하게 유지시키는 feedback 시스템을 지니고 있어서 시료의 손상과 더불어 tip의 손상을 막을 수 있고, 또한 STM에 비해서 시료의 화학적 변형을 막을 수 있다. 이런 이유에서 최근에 AFM을 이용한

방법이 널리 채용되고 있다.

2. AFM Lithography system의 기본원리

SPM의 일종인 AFM은 초기에는 시료 표면 분석 장치로 1986년 Quate, Gerber, Binning에 의해 발명되었으며 장비의 개선으로 인하여 그 응용분야가 점차적으로 확대되었다.

AFM의 구조는 그림 1에서와 같이 스프링 상수가 10N/m 이하의 작은 값을 갖는 cantilever 끝에 침두부분의 반경이 수십 Å의 tip이 장착되어있는 probe와 piezo actuator를 이용하여 x, y축 방향으로 raster scanning을 하고 z축 방향으로 photo diode의 신호에 의해 feedback되어 동작하게 된다. 이때 시료와 tip 사이에는 Van der Waals 힘, 혹은 자기력, 정전기적인 힘이 작용하게 되고 이러한 힘에 대한 실험적 수식은 Lennard-Jones의 수식 3.8.1으로 표현될 수 있다.

$$U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6}, \quad A, B : \text{constant} \quad (\text{식 3.8.1})$$

r : 원자간의 거리

이러한 인력과 척력으로 인해 발생하는 cantilever의 평형위치에서의 휨의 각도는 Yong's Modulus에 의한 수식 3.8.2으로 표현된다. 원자간의 상호작용력은 flexible한 cantilever의 각도에 변화를 야기시키고

$$\theta = \frac{FL^2}{2EI}, \quad E : \text{Yong's Modulus} \quad (\text{식 3.8.2})$$

I : Moment of inertia

L : Length of cantilever

θ 의 변화는 그림 3.8.1에서와 같이 $d - \delta d$ 와 $d + \delta d$ 의 만들어낸다. 이때 Laser source로부터 방출된 laser beam은 cantilever의 표면에 반사되어 Photo diode A, B에 전류 값의 변화시키게되며 이로부터 시료 표면 morphology나 potential을 2차원 평면형태로 나타내게 된다.

이러한 AFM은 공간 분해능이 원자 수준으로 뛰어나며 그 응용분야가 점차적으로 확대되고 있으며 그중 한 분야로 lithography 장치로도 연구가 진행중이다.

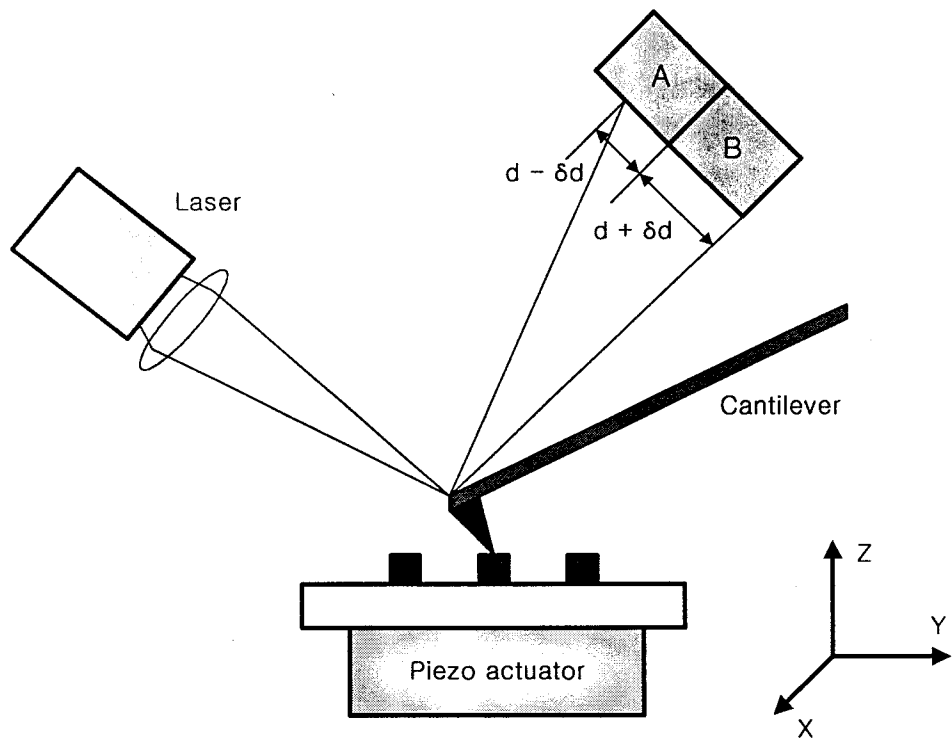


그림 3.8.1. AFM의 기본구조

3. SOG의 AFM Lithography

가. SOG의 결합구조와 물리적 성질

Lithography 공정에서 resist의 물리적인 특성은 high resolution을 위해서 매우 중요한 요소가 된다. SOG는 각 층간의 절연성 물질로써 그 형태는 액체상태이고 planarization 능력은 polyimide film과 비슷하다. SOG와 polyimide film은 둘다 CVD로 증착한 절연막과는 달리 좁은 공간을 채우는 특성을 갖고 있다. 특히 SOG의 경우 그 공정이 매우 간단하고 결합도 적으며 높은 양산성, 해로운 가스방출이 없기 때문에 소자 제조공정에서 planarization에 가장 많이 이용되고 있다. [Wolf,1990]

상용화된 SOG는 multi-layer 소자를 제작할 때 각 층간의 절연성 물질로 이용되며 그 형태는 액체 상태이고 planarization의 기능이 polyimide film과 비슷하다. SOG 물질의 종류로는 silicate와 siloxane로 그 조성비에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. SOG는 alcohols와 acetone의 다양한 비의 혼합물을 solvent로 사용하며 이때 SOG의 조성은 silicon-monomer가 녹아있는 형태를 띤다. 또한 절연성을 향상시키기 위해 silicate SOG와 siloxane SOG, 각각에 P₂O₅를 doping할 수 있다. SOG의 물리적 성질의 차이는 그 내부에 함유하고 있는 유기물의 함유량에 있으며, 상용화된 siloxane SOG의 조성비는 표. 3.8.1과 같다.

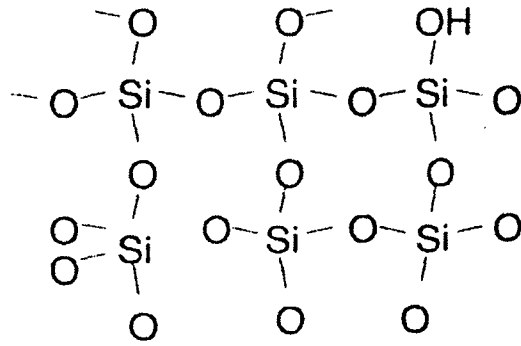
나. SOG의 AFM Lithography

SOG를 이용한 lithography에서는 SOG가 positive resister의 특성을 갖고 있으며 그림 3.8.3에 미세 pattern을 형성한 결과를 보여주고 있다. 이때 시료는 5000rpm에서 20초 동안 spin coating을 하였고 250℃에서 10분간 baking을 실행하였다. scan 속도와 scan영역의 넓이는 각각 128μm/s 와 10μm × 10μm로 주었으며 tip에 인가한 전압은 60V이고 이때 측정된 전계방출 전류는 4~6nA이었다. develop과정은 1:100 BOE용액으로 20초 동안 진행하였고 DI(deionized water)에서 1분간 rising 하였다. 그림 3.8.3에서 어두운 검은 선이 AFM tip에 의해 노광된 영역이며 이때 형성된 line의 넓이는 80nm이었다.

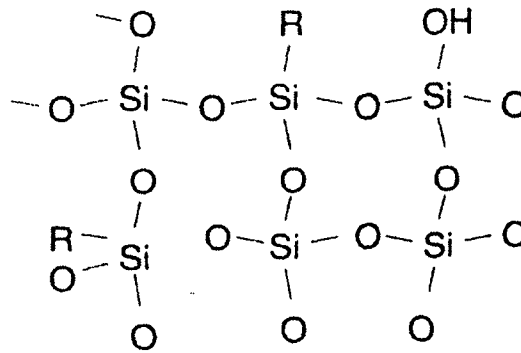
SOG film이 전계방출 전자에 노광되었을 때, SOG film내의 methyl 그룹은 제거되며 이로 인하여 유기물 함유량은 감소한다. 또한 약 425℃ 이상 온도에서 baking을 하면 SOG film내의 methyl그룹과 silanol 그룹이 동시에 제거되기 때문에 425℃ 이상 온도에서 baking한 SOG film은 AFM lithography를 위한 resist 물질로 사용이 불가능하다. 이러한 현상은 silanol 그룹이 dangling silicon 결합에 기인하여 노광된 영역과 노광되지 않은 영역에서의 서로 다른 밀도를 갖게 되며 노광된 영역에 silanol 그룹의 양이 그렇지 않은 영역에 비해 더 많은 양이 포함되어있어 develop과정에서 etching 속도의 차이를 나타내게 된다. 그러므로 노광된 영역과 노광되지 않은 영역의 etching 속도의 커다란 차이로 인하여 SOG는 scanning probe lithography를 위한 resist 물질로 사용하기에 적합하며 이때 SOG의 selectivity는 20:1이다.

Ingredient Name	Weight (%)
Ethyl Alcohol	6 ~ 16
Isopropanol	41 ~ 51
Acetone	18 ~ 28
Butyl Alcohol	6 ~ 10
Methylsiloxane Polymer	2 ~ 11
Water	Remainder

표. 3.8.1 siloxane SOG의 조성비



(a) Silicate SOG



(b) siloxane SOG

그림. 3.8.2 silicate type SOG와 siloxane type SOG의 결합구조

silicate SOG와 siloxane SOG의 구조는 그림 3.8.2에서와 425°C 이상 baking을 진행하며 siloxane SOG와 silicate SOG의 특성은 모두다 SiO₂와 유사하게된다.

AFM lithography를 위한 resist로 사용하기 위한 SOG는 200°C 이하의 온도에서 baking을 실행하여 일정정도의 유기물과 OH기를 포함하고 있어야만 한다. 특히 전자 노출후 develop 과정에서 OH기가 attack당하여 pattern이 형성되므로 OH기의 함량은 미세 패턴의 다양한 parameter를 결정하는 중요한 요소가 된다.

다. SOG multi-layer의 pattern 전달

nano-scale lithography를 실제적인 공정에 적용하기 위해서는 resist위에 형성된 패턴을 이용하여 실질적인 device 공정에서 요구하는 substrate까지 패턴이 전달되어야만 한다.

본 연구에서는 패턴 전달의 초기적인 공정을 확립하기 위하여 SOG/Cr/SiO₂/wafer의 multi-layer를 형성하였다.

p-type <100> wafer 위에 SiO₂를 열산화막으로 성장시켰다. 이때 SiO₂는 1100°C 온도에서 3시간 30분 동안 wet oxidation하였으며 두께는 1.2 μ m로 조절하였다. 산화막 위에 Cr layer는 DC sputter를 이용하여 80W의 power로 20분간 증착하여 1000Å으로 조절하였으며 Cr layer의 roughness는 rms roughness가 11.9Å, average roughness가 9.34Å이었다.

Cr layer 위에 SOG는 3500rpm에서 35초 동안 spin coating을 하였으며 ellipsometer를 이용하여 측정한 두께는 SOG대 solvent의 함유량에 따라 표 2에서와 같이 1846~911Å에 이르기까지 solvent의 함유량이 증가함에 따라 두께가 점차적으로 감소함을 보였다. 일반적으로 wafer 위에 coating 하였을 때보다 Cr layer 위에 SOG를 coating하였을 때 546~278Å의 두께가 더 두꺼워지는 차이를 보이며 이러한 차이는 Cr layer의 roughness에 기인하는 것으로 간주할 수있다. 이러한 공정을 통해 deposition된 multi-layer의 구조는 그림 3.8.4의 구조와 같다. sample holder위에 silver paste를 이용하여 sample을 고정함과 동시에 sample의 옆면도 silver paste를 이용하여 SOG를 exposure 시에 tip으로부터 방출된 전자가 원활하게 ground로 이동되게 하였다. 즉 tip에서 방출된 전자는 SOG를 통하여 Cr-layer에 도달하고 silver paste를 통해 ground로 흐르게 된다.

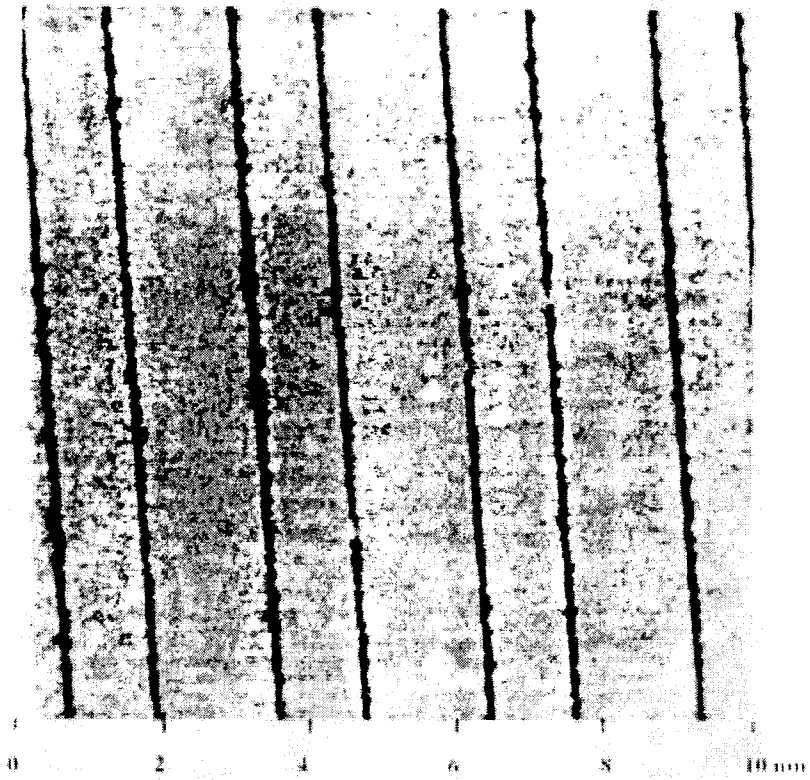


그림 3.8.3. SOG를 이용한 AFM Lithography에 의한 pattern

SOG : solvent	1:1.5	1:2	1:3	1:4	1:6	1:9
Thickness	1846 Å	1587 Å	1065 Å	954 Å	917 Å	911 Å

표. 3.8.2 SOG의 solvent 함유량에 따른 Cr layer 위에서의 두께 변화

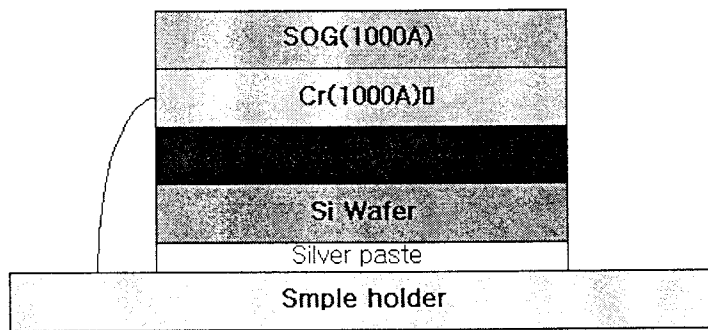


그림 3.8.4. Pattern 전달을 위해 준비된 SOG multi-layer

SOG를 실제공정에 적용하여 resist로 사용하기 위해서는 mask layer로써 pattern전달이 가능해야만하다. 또한 이러한 pattern의 전달을 통해 안정적이고 다양한 device공정의 여유도와 적용성을 증대할 수가 있다. 최근의 AFM lithography 연구 중 device제작에 적용된 예는 Univ. of Stanford의 Quate교수 연구진들에 의한 AFM 산화막을 이용한 FET(Field Effective Transistor)의 gate를 형성하는 것과 프랑스의 V. Bouchiat의 연구팀이 적용한 direct scratching과 Lift-off방식에 의한 SET(Single Electron Transistor)의 적용이 있고 대부분의 연구가 anodization에 의한 SET연구로 집중되어있다. 최근의 AFM lithography를 응용한 device공정 연구의 대부분이 특별한 소자나 방식에서 보다 일반적인 공정으로 확대되기 위해서는 mask layer로써 pattern 전달에 대한 연구가 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위해 본 연구진은 SOG의 multi-layer를 이용하여 초기적인 pattern의 전달을 조사하였다.

SOG pattern전달에 대한 실험의 전체적인 순서는 그림 3.8.5에 나타난 것과 같다.

SOG multi-layer deposition이 끝나면 그림 3.8.6에서와 같은 AFM lithography system을 이용하여 SOG를 exposure시킨다. Tip에는 negative전압을 인가하고 sample holder를 piezo actuator와 insulating한 상태에서 ground 처리하였다. Tip-sample간의 전류는 OP amp (AD549)로 전류를 전압으로 변환하여 digital multimeter로 측정하였으며 이때 증폭 비는 10^9 로 하였다. 또한 Tip은 silicon tip을 그대로 사용하였으며 wire와 접촉을 위해 silver paste를 사용하였다. 이전에 보고된 바에 의하면 silicon tip과 metal이 coating된 tip사이의 전압과 전류의 차이는 보이나 경제성을 고려할 때 그 값이 무시될만하다는 보고가 있다.

그림 3.8.6와 같은 AFM lithography system은 본 연구에서 모든 시료에 대해 같은 방식으로 적용되었다.

scan speed $5\mu\text{m}/\text{sec}$ 에 tip-sample간의 인가전압 60V를 인가하였을 때 전류는 $0.4\sim 0.6\text{nA}$ 이었으며 anodization에 의한 negative pattern이 형성되었고 이때 그림 3.8.7과 같이 line 넓이는 300nm, 높이는 125Å의 pattern을 형성하였다. 이러한 native pattern의 형성은 시료표면의 수분과 공기중의 습기 함유량과 관계 있음을 N_2 환경에서 실행했을 때와 비교하여 확인하였다.

SOG의 anodization효과는 넓은 영역을 exposure할 때 그 효과가 더 뚜렷하게 나타나며 그림 3.8.8에서 보는 바와 같이 $60\times 60\mu\text{m}$ 영역을 scan speed $100\mu\text{m}/\text{sec}$ 에 전압 64V를 인가하였을 때 전류는 1.2~2.6nA가 흐르고 exposure된 영역의 높이는 37Å의 단차를 보이였다. 이렇게 anodization 된 SOG를 희석된 BOE(1:100) 용액 내에서 20sec 동안 develop을 진행하였다. develop과정 후의 pattern이 형성된 영역의 넓이는 그림 3.8.9에서와 같이 $6.27\mu\text{m}$ 로 약 $0.27\mu\text{m}$ 정도가 더 넓어졌으며 단차는 1010Å으로 나타났다. 이는 SOG의 초기 두께와 거의 일치하는 값으로 pattern의 바닥이 Cr layer까지 전달되었음을 알 수 있다.

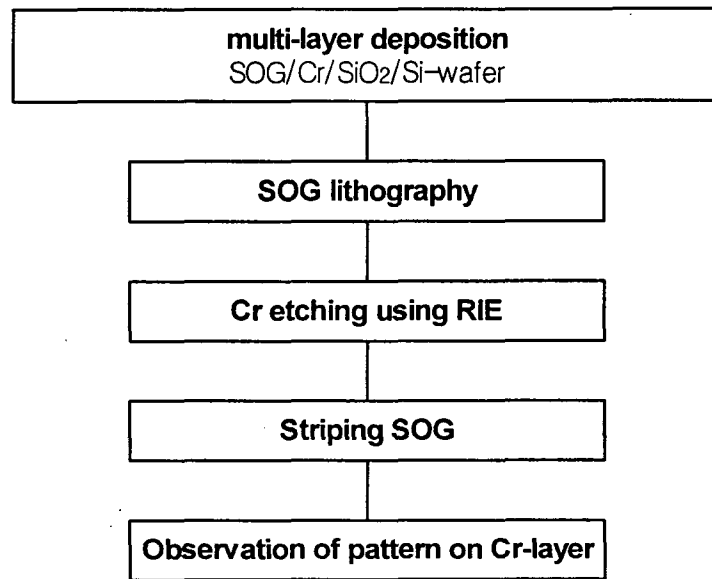


그림 3.8.5. SOG multi-layer의 pattern 전달 실험의 순서

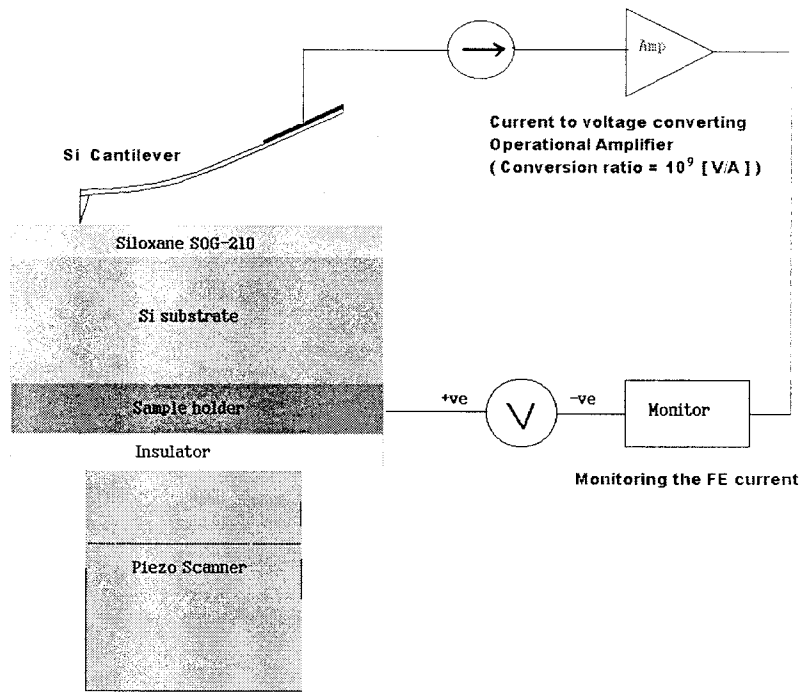


그림 3.8.6. AFM lithography system의 개략도

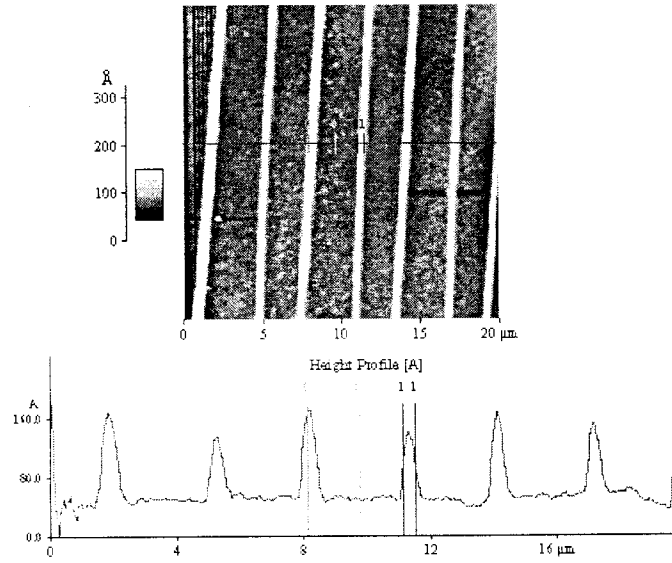


그림 3.8.7. AFM에 의한 line anodization

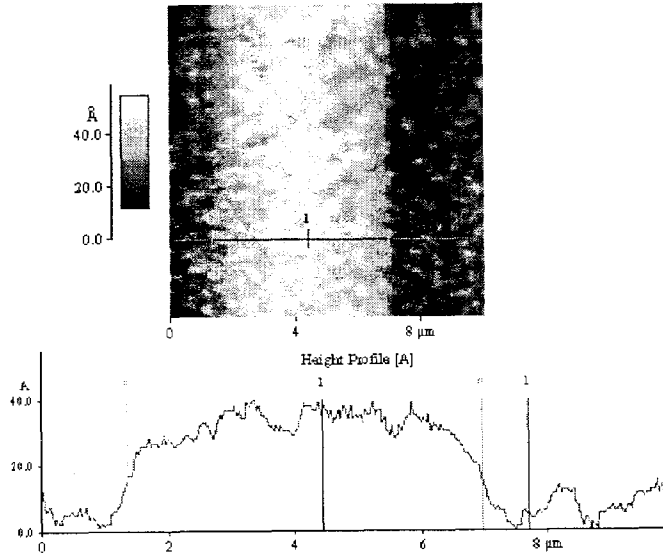


그림 3.8.8. AFM에 의한 area anodization

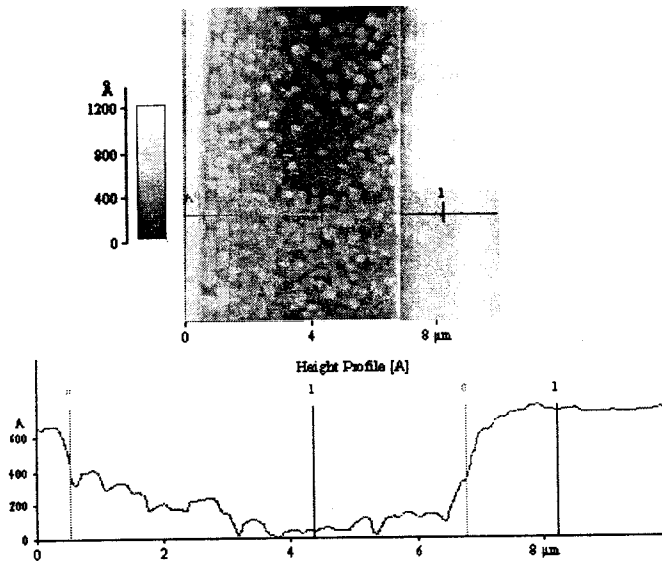


그림 3.8.9. Develop후의 positive area pattern

SOG의 develop후에 RIE(Reactive Ion Etcher)를 이용하여 Cr layer를 etching 하였다. 이때 base pressure 1.0×10^{-3} torr, working pressure 1.5×10^{-3} torr의 조건에서 gas는 $Cl_2 : O_2$ 의 비율이 1:2로 주입하고 power는 150W에서 3분 30초간 etching을 진행하였다. 결과는 그림 3.8.10에서와 같이 전체 단차는 3530 Å이었고 이중 SOG는 1186 Å, Cr의 단차는 2244 Å으로 나타났으며 Cr의 etching rate는 1000 Å/min이었다.

Cr layer에 RIE에 의해 형성된 pattern은 SOG를 BOE용액 내에서 1분 40초 동안 striping을 실행하였을 때 그림 3.8.11과 같은 Cr layer위에 pattern이 전달됨을 확인 할 수 있었다.

Cr layer 위에 형성된 pattern의 넓이는 $6.31 \mu m$ 로 최초로 exposure한 영역에 비해 $0.31 \mu m$ 가 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 초기적인 pattern의 전달을 확인 할 수 있었다.

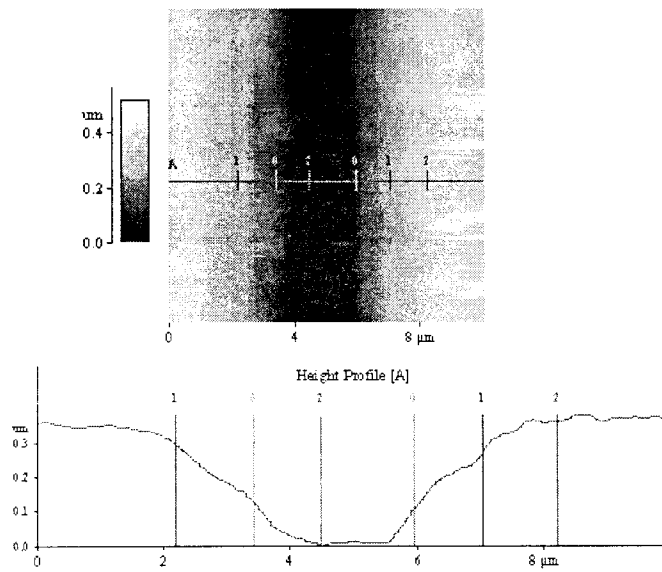


그림 3.8.10. RIE에 의한 Cr-layer의 etching 결과

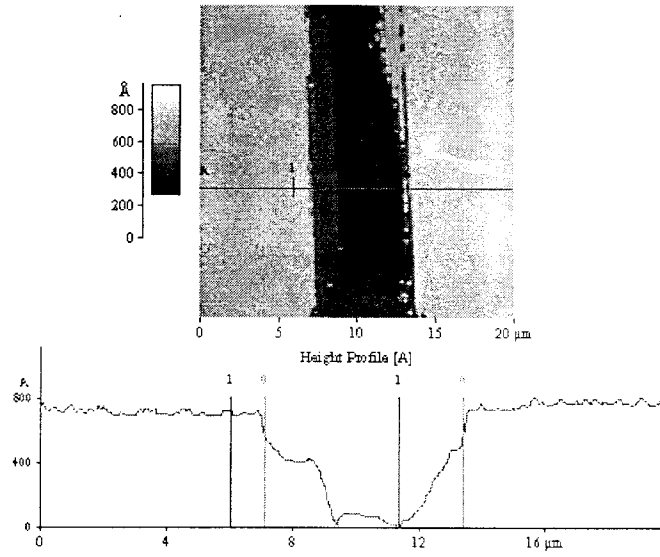


그림 3.8.11. Cr layer위에 형성된 AFM lithography의 pattern

4. PMPMA의 AFM Lithography

가. LB(Langmuir-Blodgett) deposition과 PMPMA의 결합구조

Langmuir-Blodgett film은 deposition을 위해 substrate 표면을 hydrophobic 또는 hydrophilic한 상태로 처리를 한후 그림 3.8.12에서와 같이 얇은 분자막을 water 표면에 뿌린 후 barrier로 monolayer를 밀착시켜 고체와 액체의 중간상태에 이르는 분자간격을 유지시킨다.

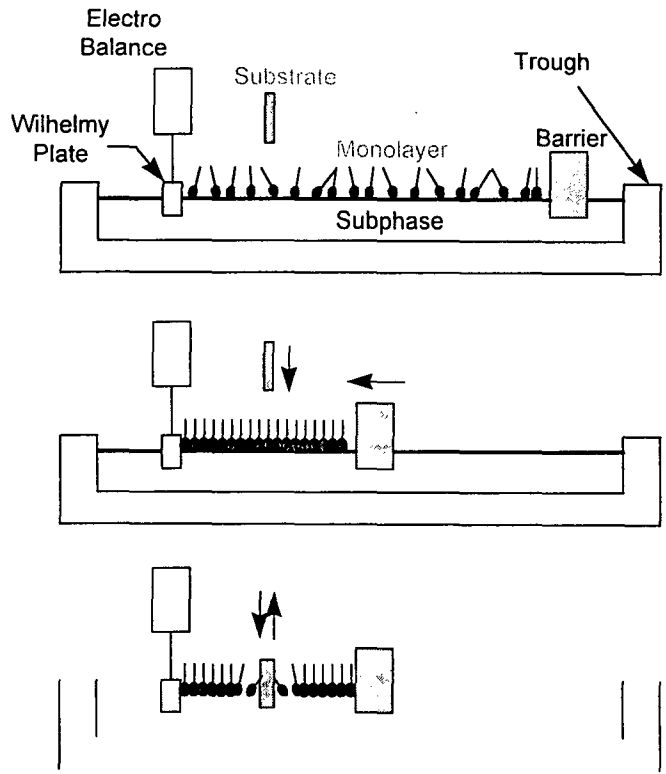
그 후에 준비된 bath속으로 담가 분자막을 X, Y, X-type으로 deposition한다. 이때 transfer ratio(TR)은 식 3.8.3과 같이 나타낼 수 있다. barrier는 TR만큼의 보정을 통해 water위의 monolayer의 밀착된 압력을 일정하게 유지한다.

$$TR = \frac{\text{decrease in Langmuir monolayer surface area}}{\text{total surface area of substrate}} \quad (\text{식 3.8.3})$$

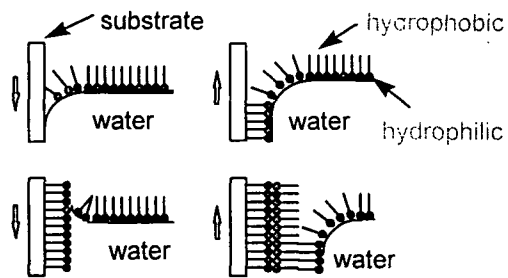
PMPMA(polymethylphenylmethacrylate)는 상용화되어있는 e-beam resist인 PMMA

(polymethylmethacrylate)에 phenyl 그룹을 첨가하여 열적, 구조적 안정성을 향상시킨 물질로 AFM lithography를 위해 합성하였다. 합성 방법에 대한 분자 구조를 그림 3.8.13과같이 acid-catalyzed esterification에 의한 methacrylic acid와 p-cresol로부터 p-(methyl)phenyl methacrylate가 준비되고 chromatography column에 의해 정제된다. toluene속에서 MPMA와 AIBN(0.5 mol %의 monomer)의 혼합액을 N₂ 환경의 70℃에서 48시간동안 순환시킨다. 생성물은 여러 번에 걸쳐서 methanols로 세척하고 침강되며 진공상태의 oven에서 건조된다.

합성된 시료는 액상을 하고있으며 이러한 시료를 LB deposition을 위해 액상의 PMPMA(0.8mg/ml)를 DI-water 표면에 뿌려주고 그림 3.8.12에서와 같이 barrier를 이용하여 1cm/min의 속도로 표면 막을 압축시킨다. monolayer가 closely-packing 상태가 되어 표면 압력이 30Nm/m이 된다. LB deposition을 위해서는 substrate가 hydrophilic 혹은 hydrophobic한 처리를 거쳐야하는데 PMPMA의 경우 wafer 표면에 HDMS(hexanmethyldisilazane)를 5000 rpm에서 30초 동안 spinning하고 110℃에서 15분간 건조시키면 substrate 표면이 hydrophobic한 상태가 된다. 이렇게 준비된 substrate를 PMPMA가 closely-packing된 DI-water bath 표면에 수직으로 0.5mm/min의 속도로 담근다. substrate가 바닥까지 완전히 잠기면 멈춰진 상태에서 120초를 기다리고 다시 substrate를 수면위로 0.5mm/min의 속도로 꺼낸다. 이때의 monolayer의 표면 압력은 30Nm/m으로 유지되며 5분 후에 꺼내어지는 과정이 멈춰진다. 이러한 공정을 통해 PMPMA LB film은 2층의 Y-type으로 deposition되며 이때 온도는 25℃를 유지하였다. 위의 공정을 반복하여 4층, 6층, 8층의 LB film의 deposition하였다. film이 deposition된 substrate는 convection oven내에서 10분간 110℃의 온도로 baking을 하게된다. 2층의 Y-type PMPMA LB film의 두께는 ellipsometer로 측정하였을 때 40Å이었다.



(a) Langmuir-Blodgett film deposition 장치



(b) Langmuir-Blodgett film의 deposition

그림 3.8.12. LB film의 deposition system 개략도

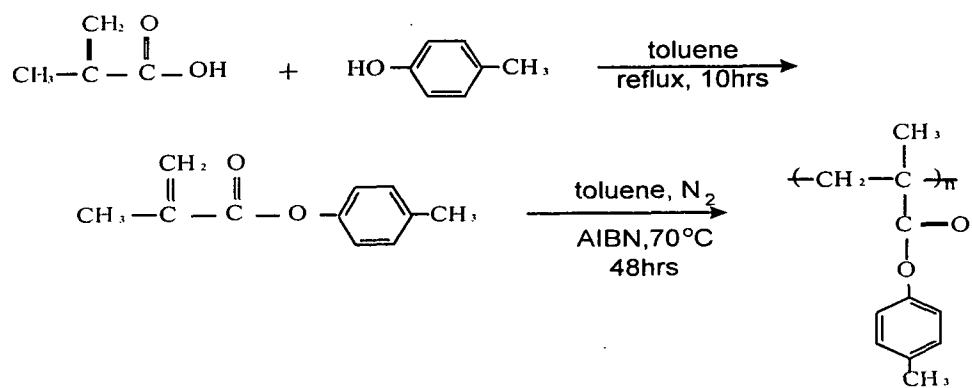


그림 3.8.13. PMPMA의 합성과 결합구조

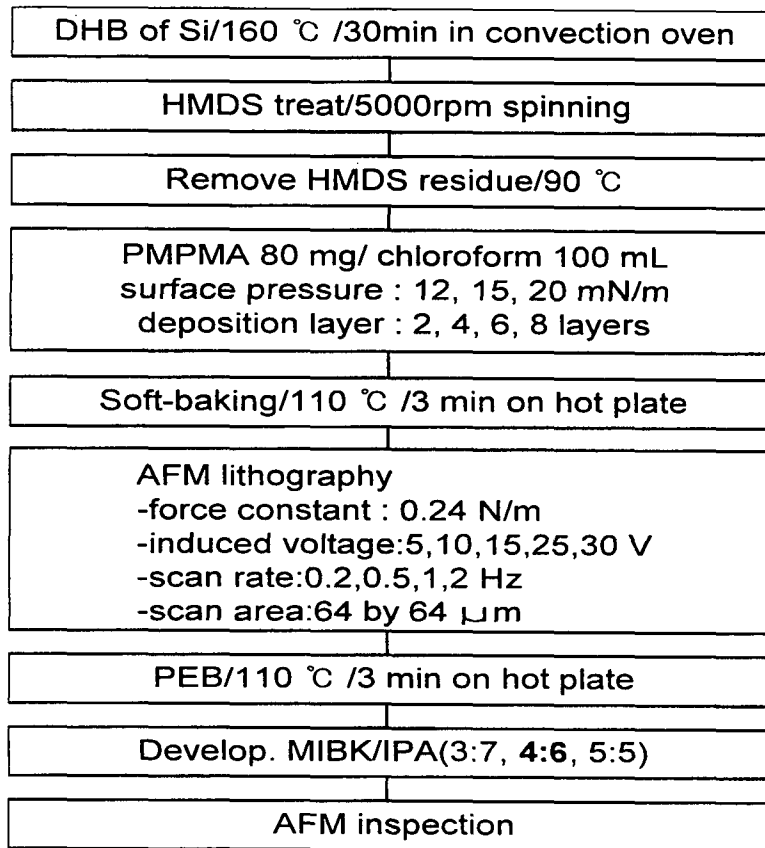


그림 3.8.14. PMPMA LB film의 deposition과 AFM lithography 과정

LB film의 deposition 순서와 lithography 과정은 그림. 14에 나타내었다.

나. PMPMA LB film의 AFM Lithography

LB PMPMA film을 AFM holder에 carbon paste로 접착하여 공기 중에 contact mode로 작동하는 AFM의 scanner 위에 장착을 한다. 이때 시료 holder는 piezo scanner와 전기적으로 절연되어있으며 silicon tip은 0.24N/m의 spring 상수를 갖는 것을 사용하였으며 전계전자방출을 위해 tip에 인가한 전압은 직류 negative 5~30V이었다. 전계방출 전류측정은 전류를 전압 값으로 10^9 V/A의 비율로 변환시킬 수 있는 OP amp(AD 549)를 사용하여 측정하였다. lithography는 전압과 scan speed를 변화시켜가며 실행하였으며 각각의 시료중 12mN/m의 표면압력으로 barrier를 밀고 4층 Y-type으로 deposition한 LB PMPMA film이 가장 안정적인 반응을 보였다. 또한 scan speed는 $10\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 exposure했을 때, 가장 적합한 pattern을 형성할 수있었다. 특히 tip에 인가한 전압에 따른 pattern의 형성은 그림 3.8.15와 그림 3.8.16에서와 같이 각각 25V에서는 negative, 15V에서는 positive pattern이 형성되었다.

exposure된 시료는 MIBK:IPA의 비가 5:5인 developer내에서 30초와 40초 동안 담그어 develop을 실행하였고 convention oven에서 110°C 온도를 유지하며 4분간 baking을 하였다. 그림.15와 그림. 16에서와 같이 pattern이 전압에 따라 negative에서 positive로 전환되는 것은 높은 전압(25V)에서 PMPMA의 exposure된 영역에서 PMPMA분자간에 cross-linking에 의한 것으로 간주할 수 있다. 그림 15의 negative pattern의 line 넓이는 120nm를 형성하였고 그림. 16의 positive pattern의 line 넓이는 $0.5\mu\text{m}$ 이었다.

5. ODMS의 AFM Lithography

가. ODMS의 구조와 SAM deposition

ODMS(octadecyldimethylmethoxysilane)의 구조는 그림. 3.8.17에 나타난 구조를 가지고 있으며 SAM(self assembled monolayer)로 deposition된 film의 경우 LB film과 같이 단일 분자 및 고분자 단위의 얇은 막의 두께를 조절할 수있고 그 표면의 roughness가 안정적이라는 것이 특성이다. 이러한 ODMS의 deposition은 native oxide가 존재하는 Si wafer를 pirahna soln에 1시간 정도 담가 표면에 OH를 올려 hydrophilic한 상태를 만들어 substrate를 준비한다. Octadecyl dimethyl methoxysilane 0.1M을 membrane filter($0.2\mu\text{m}$)를 이용하여 filtering한 Hexane에 녹여 준비된 용액 내에 hydrophilic 표면 처리가 된 substrate를 16~18시간 담가 두면 ODMS의 $-\text{OCH}_3$ 가 wafer표면에 있는 OH와 결합하여 그림. 3.8.18에서와 같은 결합을 이루게 된다. 이때 막의 두께는 ellipsometer로 측정하였으며 ODMS의 단일 분자크기에 해당하는 17\AA 이었다. 이러한 deposition은 25°C , gloove 상자 내에서 실행하였다.

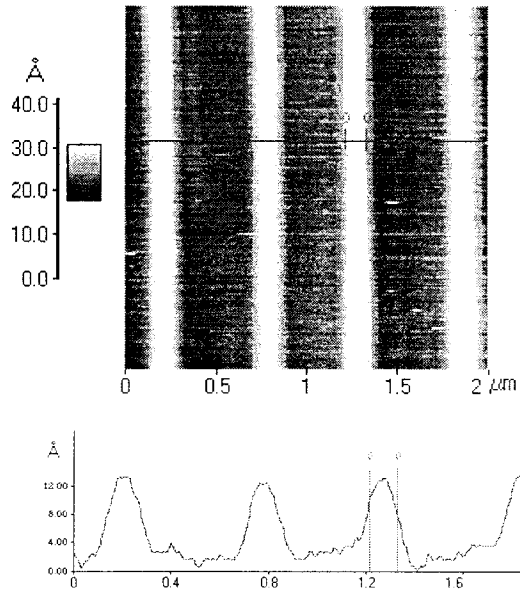


그림 3.8.15. LB PMPMA negative pattern 형성

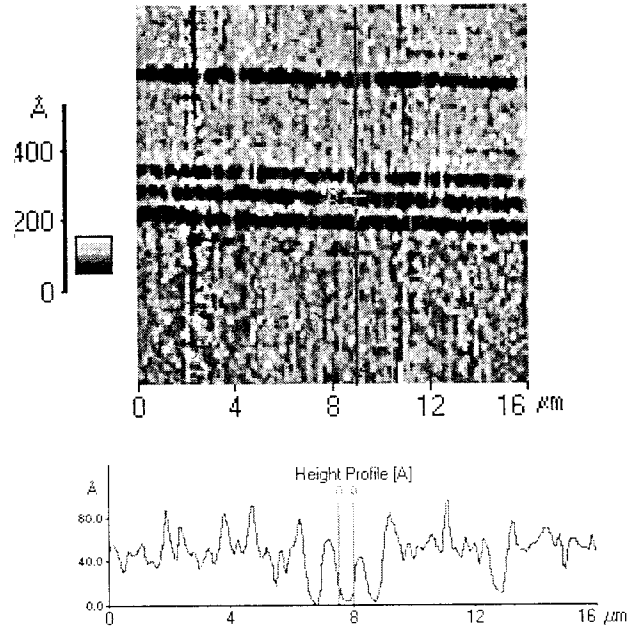


그림. 3.8.16. LB PMPMA positive pattern 형성

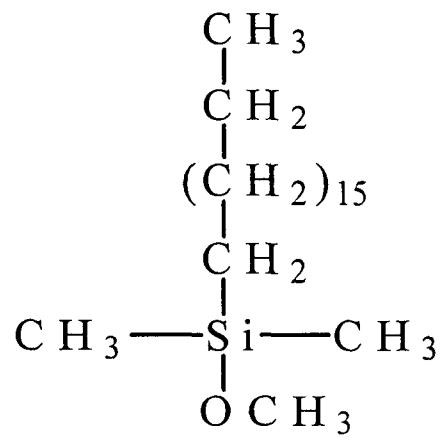


그림. 3.8.17. ODMS의 분자구조

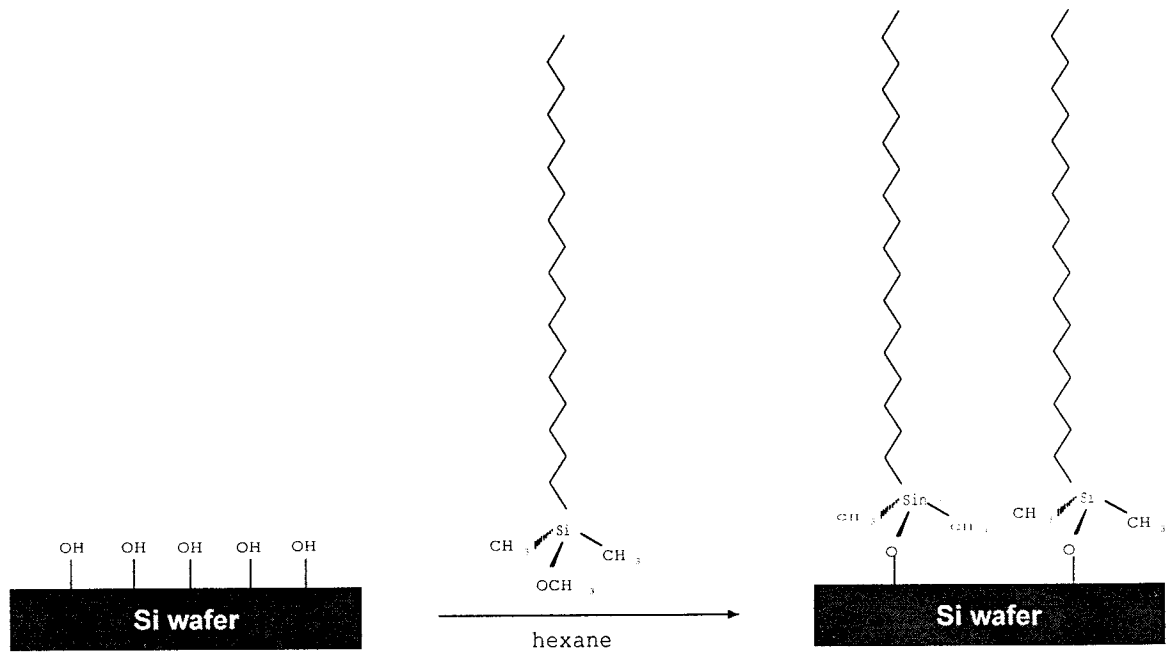


그림. 3.8.18. ODMS의 self assembled monolayer

나. ODMS SAM의 AFM Lithography

AFM의한 ODMS SAM의 exposure는 tip에 negative 20~30V의 전압을 인가하고 다양한 scan speed로 실행하였다. 30V이상에서는 scratching이 발생하였으며 20V 이하의 전압에서는 anodization에 의한 negative pattern이 형성되지 않는다. 그림. 3.8.19의 anodization에 의한 negative pattern은 시료표면의 수분에 의해 SiO_x의 형성으로 추정되며 이때 전압은 22V, scan speed는 120 μ m/sec, 전류는 0.3~0.7 μ A로 측정되었다. anodization에 의한 pattern의 넓이는 75nm이고 높이는 3.78nm를 형성하였다. Exposure된 시료는 희석된 BOE(1:50)에서 1min 동안 develop을 하였으며 그림. 3.8.20에 보인바와 같이 넓이 118nm, 깊이 1.83nm의 positive pattern을 형성하였다. ODMS SAMs의 초기 두께가 17Å인데 비해 최종적으로 형성된 positive pattern의 깊이가 1.83nm이므로 ODMS 위의 anodization된 영역의 pattern이 Si wafer 위의 native oxide까지 전달되었음을 확인할 수가 있다. 또한 ODMS에 다양한 pattern의 가능성을 확인하기 위하여 그림. 3.8.21의 "S"자 형태의 pattern을 형성하였다.

6. Terpolymer의 AFM Lithography

가. Terpolymer의 구조와 증착

유동 전계 방출원(AFM) 리소그래피를 위해 합성된 Terpolymer의 구조는 MMA, BPMA, MAA의 세가지 단일 폴리머를 이용하여 합성된 구조로 그림 3.8.22.의 구조로 이루어져 있다.

Terpolymer의 합성절차는 그림 3.8.23.에 나타난 절차에 의해 진행되며 최초 MMA와 BPMA, MAA를 THF용액내에서 섞어(stirring) 준다. 그 다음 반응을 유발시키는 AIBN의 개시제를 넣어주면 반응이 시작된다. 단일 폴리머들이 각각의 이중결합을 끊고 단일 결합을 일의키는 시간은 67°C에서 12시간 동안 진행된다. n-hexane과 toluene의 혼합물 내에서 침강(precipitation)시킨다. 침강(precipitation)된 혼합물을 필터에 걸러내고 진공오븐(Vacuum Oven)내에서 24시간 동안 건조시키면 Terpolymer가 형성된다.

나. Terpolymer의 AFM 리소그래피

합성이 끝난 Terpolymer를 PGMEA 20ml에 0.16g을 녹여 스핀너를 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 2000rpm의 회전 속도로 30초 동안 회전시킨다. 이렇게 코팅된 Terpolymer를 오븐 안에서 110°C를 유지하며 10분간 베이킹을 한다.

코팅된 terpolymer의 두께는 엘립소메터를 이용하여 측정하였을 때 160Å을 나타내었다.

준비된 시료는 AFM을 이용하여 시료와 팁 간의 전압을 -16V 인가하여 스캔 속도 5 μ m/sec의 속도로 노광시킨다. 노광된 시료는 오븐내에서 110°C를 유지하며 1분간 베이킹(PEB)을 한다. 이처럼 전자에 노광된 시료는 1:250으로 희석된 TMA내에서 5초간 식각시킨다.

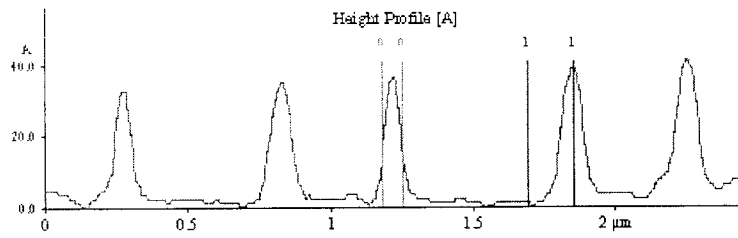
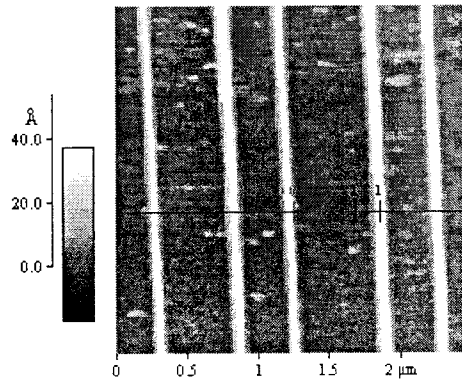


그림.3.8.19. ODMS의 anodization된 negative pattern

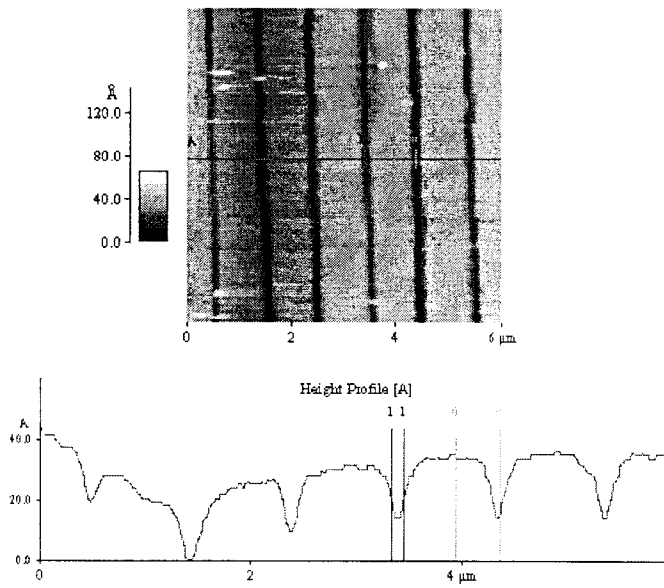


그림. 3.8.20. ODMS의 develop후에 형성된 positive pattern

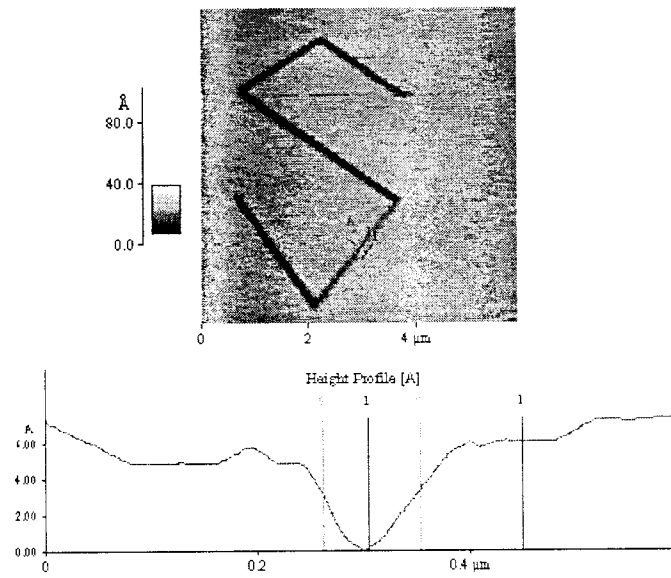


그림. 3.8.21. ODMS의 anodization에 의한 다양한 pattern 형성

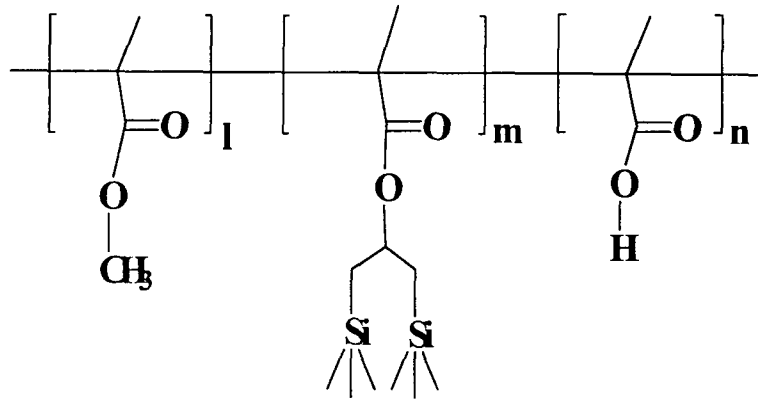


그림 3.8.22. Terpolymer p(MMA-BPMA-MAA)의 구조도

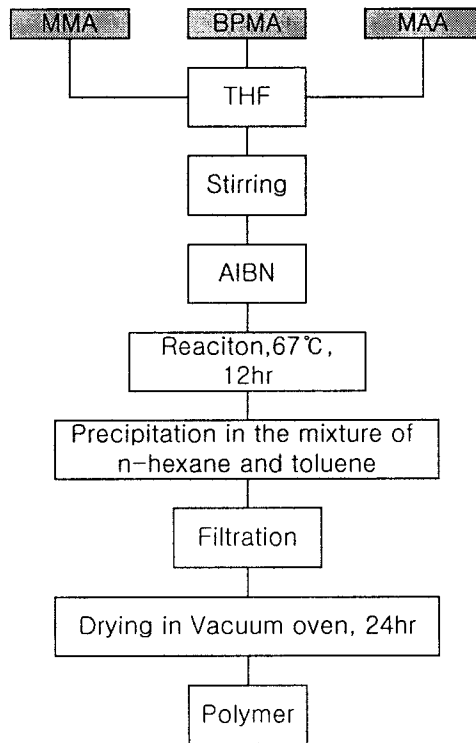


그림 3.8.23. Terpolymer의 합성과정

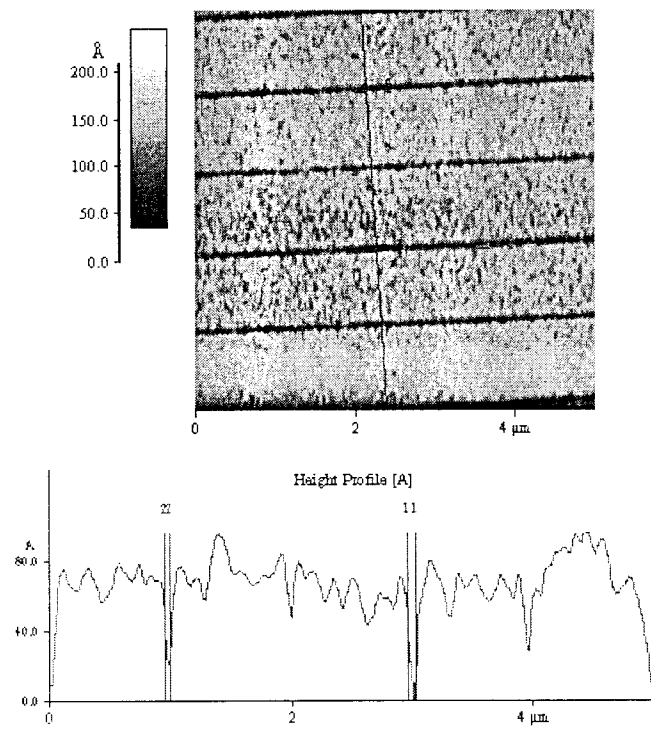


그림 3.8.24. Terpolymer 위에 형성된 AFM 리소그래피 패턴

AFM을 이용하여 검사한 패턴의 형성은 그림 24.와 같으며 이때 최소 선폭은 588 Å을 획득하였다.

제 9 절 FE-tips(Field Emission-tips) Lithography

1. FE-tips (Field Emission-tips) Lithography system

본 연구에서 제작된 FE-tips (Field Emission tips) Lithography system은 전계에 의한 전자 방출을 기본적인 model로 하고 있으며 이러한 전계에 의한 전자 방출(Field Emission)의 전류는 Fowler-Nordheim 식 3.9.1에 의해 설명되어진다.

$$J = \frac{AE^2}{\phi^2(y)} \exp\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{E} \nu(y)\right) \quad [A/cm^2], \quad A, B : \text{constant} \quad (\text{식 3.9.1})$$

E : 전기장의 세기

ϕ : working function

y : schottky barrier

본 연구진이 제작한 FE-tips Lithography 장치는 그림 3.9.25와 같은 구조로 되어있으며, pattern 형성을 위한 stage 이동은 3축 구동 piezo 소자 (piezotronics TRITOR 100NV, 100 μ m)의 x, y축을 이용하였다. 또한, pattern을 형성 시킬 때, 캐소드 tip과 시료와의 수 μ m정도의 일정한 간격을 유지하기 위하여 piezo 소자의 z축을 이용하였다.

FE-tips Lithography 장치의 cathode는 직경 0.08mm의 텅스텐 와이어(wire)를 KOH 1M 용액에 전해에칭하여 제작하였으며, 전해에칭된 캐소드의 첨단부에 대해 광학현미경으로 관측한 결과는 그림 3.9.26와 같다.

2. FE-tips Lithography

가. SAL 601의 FE-tips Lithography

그림 3.9.25와 같은 리소그래피 시스템을 적용하여 SAL601(Shpley社)[Landon, 1986][Nakano, 1994]에 노광 시킨 후 AFM을 이용하여 형성된 패턴을 검사하였다. 이 때 사용된 SAL601은 2500rpm에서 30초간 스피너를 이용하여 웨이퍼 위에 코팅하였고 오븐에서 85 $^{\circ}$ C 베이킹하였다. 이 때 레지스트의 두께는 1 μ m로 측정되었다. 전자 노광 조건은 캐소드 인가전압 $V_c = -2kV$, 이때 애노드 측정전류 $I_a = 115nA$ 이고, 스캔 속도는 25 μ m/sec로 진행하였다.

노광시킨 시료는 MF-322(Shipley developer)를 이용하여 실온에서 디벨롭을 3분간 진행하였다.

AFM을 이용한 선폭의 측정은 그림 26.와 같이 측정되었으며 이 때 측정된 이미지는 그림 27.에 나타내었다. 이 때 패턴의 최소 선폭은 0.746 μ m 이었다.

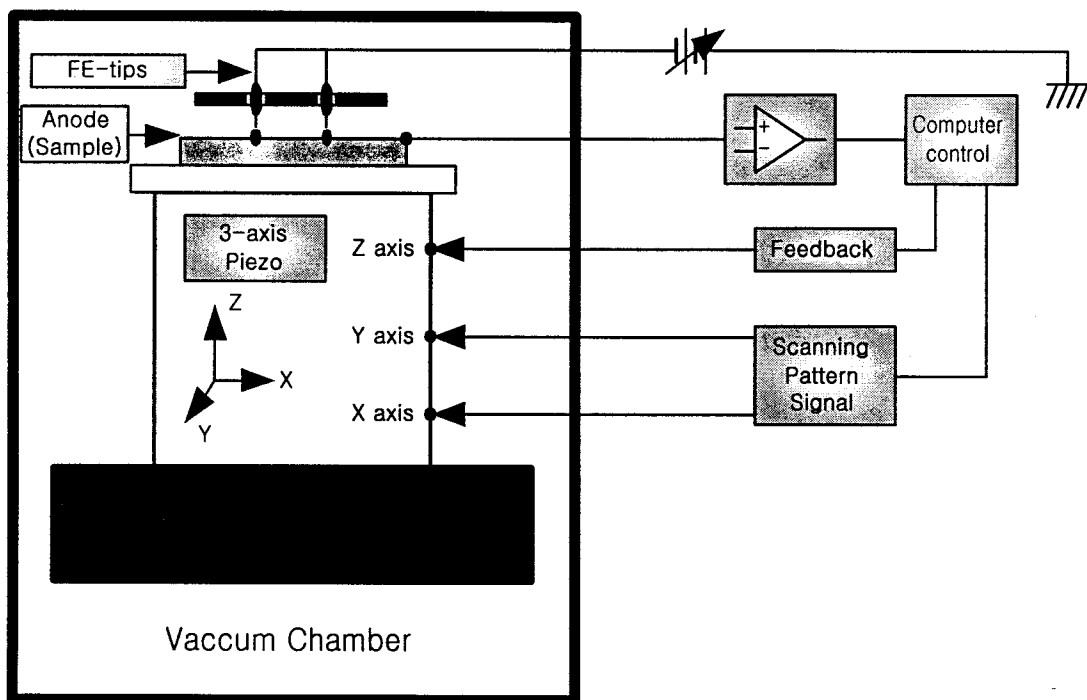


그림 3.9.25. 제작된 FE-tips Lithography system 기본 구조도

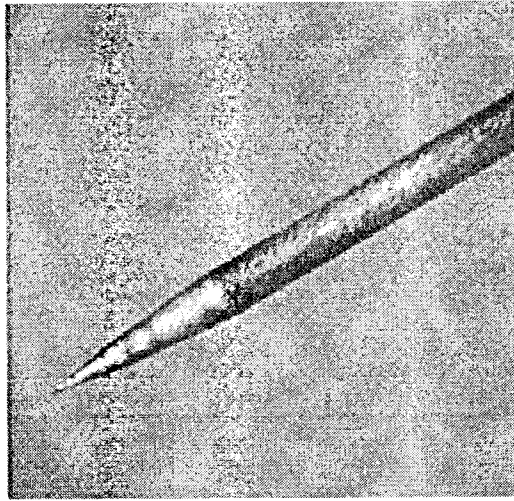


그림 3.9.26. FE-tips 제작을 위한 Cathode tip의 광학현미경 image

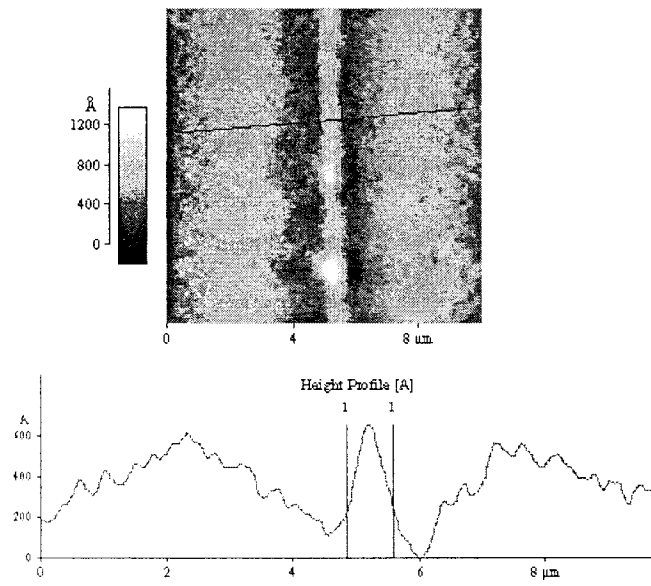


그림 3.9.27. SAL601 위에 형성한 FE-tips 리소그래피 패턴의 AFM 이미지

나. EBR-9의 FE-tips Lithography

FE-tips lithography에 사용된 EBR-9(Torry社)은 4000rpm에서 50초간 스피너를 이용하여 웨이퍼 위에 코팅하였고 200℃에서 30분간 베이킹을 하였다.

이 때 EBR-9 레지스트의 두께는 약 300Å으로 측정이 되었다.

이와 같이 준비된 EBR-9 시료에 그림 25.와 같은 리소그래피 시스템을 적용하여 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 노광 시킨 후 120℃에서 30분간 베이킹을 하였다.

그 후 완성된 시료를 AFM을 이용하여 형성된 패턴을 검사하였다. 이 때 형성된 이미지는 그림 3.9.28에 나타내었다.

이 때 패턴의 최소 선폭은 0.514 μ m 이었다.

이러한 결과를 통해 본 연구에서는 FE-tips Lithography를 제작하여 실제 리소그래피가 실행 가능함을 밝혔다. 이는 본 연구에 의해 최초로 보고된 FE-tips를 이용한 리소그래피 결과이다.

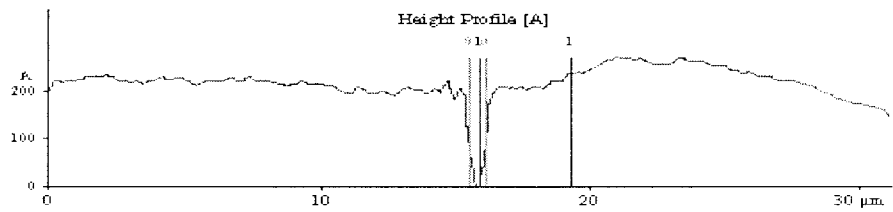
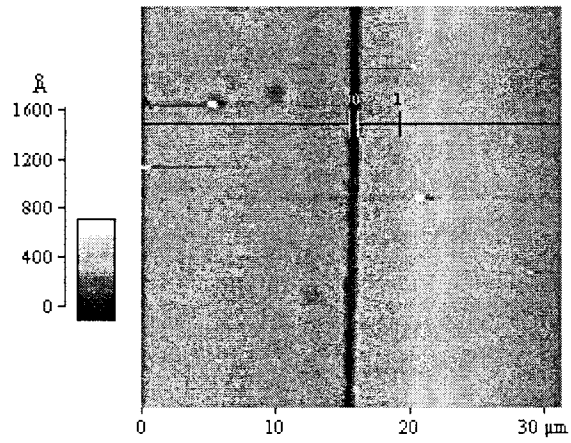


그림 3.9.28. EBR-9 위에 형성한 FE-tips 리소그래피 패턴의 AFM 이미지

3. 개선될 FE-tips Lithography system

이러한 가능성을 바탕으로 본 연구진이 앞으로 추구하는 차세대 리소그래피 시스템의 개략도를 그림 29.에 나타내었다.

그림 3.9.29에서 AFM tip은 기존의 AFM Lithography에서처럼 Pattern 형성에 직접적으로 관여하지 않고 수 nm정도의 정밀도를 가지고 pattern의 alignment를 유지시키는 데에 이용된다. 또한, AFM tip은 시료표면에 approach되어 다수의 FE-tip 으로부터 패턴이 형성될 때 FE-tip과 시료표면과의 일정한 간격을 유지하는 spacer의 역할도 수행할 것이다.

그림 3.9.29에서 AFM tip은 기존의 AFM Lithography에서처럼 Pattern 형성에 직접적으로 관여하지 않고 수 nm정도의 정밀도를 가지고 pattern의 alignment를 유지시키는 데에 이용된다. 또한, AFM tip은 시료표면에 approach되어 다수의 FE-tip 으로부터 패턴이 형성될 때 FE-tip과 시료표면과의 일정한 간격을 유지하는 spacer의 역할도 수행할 것이다.

Pattern 형성에 직접적으로 관여하는 것은 Pattern generator와 multi FE-tip 들이며, Pattern generator를 통하여 각각의 FE-tip이 독립적으로 제어를 받고 pattern을 형성시키게 된다. 이때 Through-put rate는 FE-tip의 개수에 따라 결정되며, FE-tip의 개수는 Pattern Generator에서 제어할 수 있는 최대 tip의 개수와 균일한 beam 방출을 유도할 수 있는 최대 tip 개수에 의존한다.

Alignment를 위하여 stage는 mechanical linear motor와 piezo-stage로 구성되어 정밀 구동이 가능하도록 제작한다. Pattern에 대한 X, Y축 구동은 mechanical linear motor를 사용하여 μm 단위 이하의 정밀도로 제어가 가능하도록 구성하며, Z축은 tip과 시료 표면과의 간격을 조정하여 pattern 형성에 지대한 영향을 미치므로 piezo material을 사용하여 nm단위의 정밀도로 구동되도록 system을 구성한다.

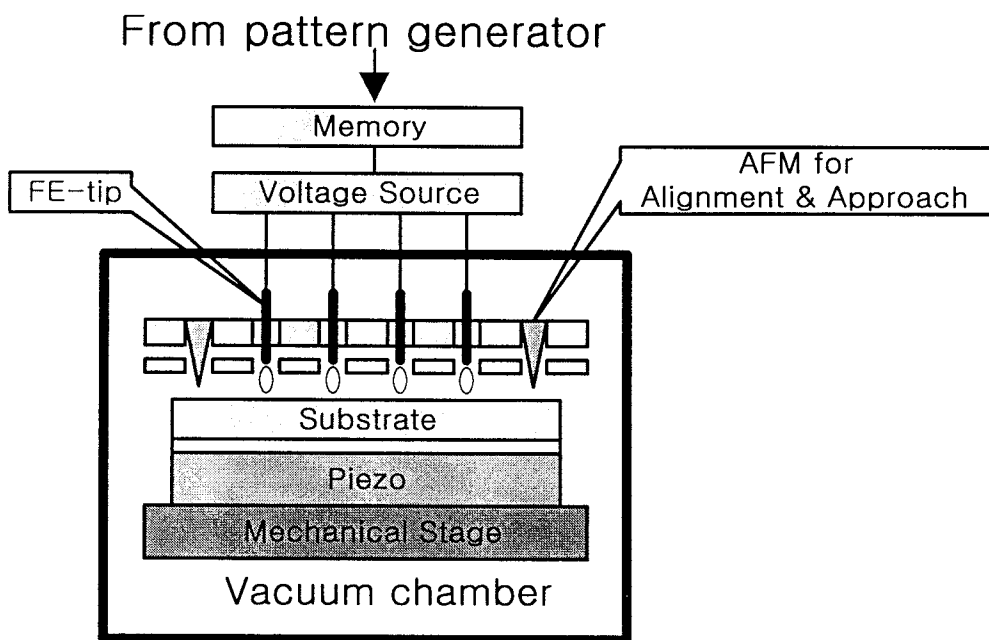


그림 29. Lithography system의 Main chamber 구조도

제 10 절 이동대의 운동 정확도 측정

1. 간섭계의 구성

설계 구성된 레이저 간섭계는 헤테로다인 방식의 마이켈슨 간섭계이며 안정화 레이저 광원, 광속분할기, 편광 광속분할기, $\lambda/4$ 판, corner cube, 거울, 광 검출기, 위상검출회로, 그리고 위상검출회로의 출력을 거리로 환산하는 컴퓨터로 구성된다. 각 구성요소를 살펴보면 다음과 같다.

레이저 간섭계에는 환경의 변화와 진동에 강인한 안정적인 광학계가 필요하다. 그림 3-10-1에 설계한 광학계를 도시하였다. 광이 지나가는 경로는 다음과 같다. 레이저에서 나온 빛은 광속분할기(Beam splitter)를 지나면서 일부를 검출기로 신호를 얻는다. 검출기 앞에는 45° 방향의 편광판을 두어 직교하는 두 편광성분을 합쳐 간섭이 일어나게 한다. 이 빛을 고속 광검출기로 받으면 두 빛의 주파수 차이로 인한 맥놀이 신호가 만들어진다. 이 신호를 기준 신호로 사용한다. 통과한 광은 편광광속분할기에서 편광 방향에 따라 나뉘어져 수평 편광 성분은 편광광속분할기를 통과하여 교정 대상이 부착된 거울(A)로 향하고 수직 편광 성분은 X선 간섭계에 부착된 거울(C)로 향한다. 수평 편광 성분은 $\lambda/4$ 판을 지나면서 원편광으로 바뀐다. (A)에서 반사된 광은 다시 $\lambda/4$ 판을 통과하면서 수직 편광으로 바뀐다. 수직 편광은 편광광속분할기에서 반사되므로 광은 corner cube로 들어가게 된다. 마찬가지로 경로사이에 놓여진 $\lambda/4$ 판을 두 번 지나고 편광상태가 90° 변하여 편광광속분할기를 투과하여 거울(B)로 가게 된다. 간섭을 일으키는 두 광속의 경로는 각기 A-B, C-D로 E거울을 맞은 두 광은 편광판에서 합쳐져 측정 맥놀이 신호가 만들어진다. 이 때 측정 신호는 광경로차에 의해 기준 신호와 위상차가 발생한다. 기준 신호와 측정 신호를 위상검출회로에 넣어 위상차를 측정한다. 제작된 간섭계는 그림 3-10-2와 같다. $\lambda/4$ 판, 편광광속분할기, corner cube를 모두 붙여 부피를 작게 할 뿐만 아니라 광학부품들의 상호 진동으로 인한 간섭신호의 진폭변화등을 억제하여 안정성을 높였다. Corner cube 뒷면에는 알루미늄 코팅을 하여 광이 corner cube를 맞고 나올 때 편광이 유지되도록 하였다. 이 간섭계로 얻은 기준 신호와 측정 신호를 오실로스코프를 통해 보면 그림 3-10-3과 같다.

구성된 간섭계의 특징을 알아보면 다음과 같다.

- 1) 마이켈슨 방식의 헤테로다인 간섭계이다. 따라서 호모다인 간섭계보다 쉽게 0.1° 의 위상 분해능을 구현할 수 있으며 측정 환경에 강인하다. 광학적인 분해능은 $\lambda/2$ 로 거울이 $\lambda/2$ 의 거리만큼 움직일 때 360° 만큼 위상이 변한다.
- 2) 간섭을 일으키는 두 광이 거의 동일한 경로를 진행하므로 온도변화, 진동, 공기 굴절을 변화에 민감하지 않다.
- 3) 광학부품을 모두 접합하여 compact하게 구성하였기 때문에 부피가 작고 외부 진동에 대해 안정적이다.

2. 위상측정회로

앞 절에서 서술한 바와 같이 위상측정에서 고려할 점은 위상 분해능과 측정속도이다. 구성된 간섭계는 서브 나노미터의 정확도와 분해능을 목표로 하므로 위상 분해능은 적어도 0.1° 가 요구되며 위상기준점 근처(위상값 0° 와 180° 부근)에서는 0.1° 의 정확도가 필요하다. 따라서 몇가지 위상측정방법을 비교검토하여 위상 측정회로를 구성하였다.

가. Phase meter

현재 상용화된 phase meter(Krohn-Hite Corp. model 6620)는 분해능이 0.01° 로 매우 높다. 이 phase meter의 정확도를 테스트하기 위하여 두 개의 파형 발생기에 phase lock을 걸어서 기준 신호와 일정한 위상차를 가진 측정 신호를 만들어 낸다. 신호의 주파수는 간섭계의 신호 주파수 2MHz와 같다. 그림 3-10-4는 위상 측정오차를 위상값에 대해 나타낸 것으로 위상차가 0° 와 360° 일때 오차가 0.03° 이다. 그러므로 목표한 간섭계에서 요구하는 정도를 만족시킨다. 하지만 측정속도가 2 Hz로 이송 가능한 최대속도는 $0.6 \mu\text{m/s}$ 이다. 총 이송거리가 1 mm인 경우 걸리는 시간은 최소 30분으로 이 시간동안의 온도 drift는 측정결과에 영향을 미칠 수 있다. 또한 위상기준점 근처에서 미러가 움직이지 않도록 제어하는데 어려움이 있다.

나. Phase sensitive detector를 이용한 위상검출기의 제작

앞 절에서 검토한 바와 같이 상용 Phase meter로는 구성된 레이저 간섭계에서 요구하는 사양을 만족시키기 어려우므로 위상 분해능 0.1° , 위상측정 속도 1 kHz를 목표로 phase sensitive detector를 이용하여 간섭계에 사용될 위상검출기(phase demodulator)를 제작하였다.

그림 3-10-5는 위상검출기를 도시한 것으로 광검출기에서 나오는 2 MHz의 두 신호를 받아서 위상차에 비례하는 두 개의 5-Vpp 출력을 내도록 설계되었다. 측정속도는 1 kHz 또는 그 이상의 속도를 낼 수 있다. 위상차가 90° 인 두개의 출력을 이용하여 변위의 크기와 방향을 알아낸다.

측정 신호(SIG)는 0° power splitter(Mini-Circuits model ZSC-2-1W)를 거쳐 둘로 나뉘어지며 각각 고속 comparator에 의해 정현파가 구형파로 바뀌게 된다. 0° power splitter는 양쪽의 부하가 다르더라도 균등하게 power를 공급하는 역할을 한다. 그리고 구형파의 진폭은 정현파의 진폭에 상관없이 일정하므로 레이저 광원의 출력 변화나 정렬오차에 의한 진폭변화에 회로는 영향을 받지 않는다. 기준 신호(REF)는 0° power splitter를 거쳐 한쪽은 바로 comparator로 들어가며 다른 한쪽은 RC filter, noninverting amplifier를 거쳐 phase delay가 90° 가 되어 comparator로 들어가도록 하였다. Blocking Capacitor를 거쳐 dc성분이 제거된 구형파가 각각 phase sensitive detector(Mini-Circuits model MPD-1)에서 곱해진 다

음 low pass filter를 통과하여 고주파수 성분을 제거한다. 이 신호는 저잡음 op-amp 증폭기를 통해 10배 증폭되어 출력된다. Phase sensitive detector에서 곱해지는 두 신호 모두 구형파이므로 출력이 위상의 코사인 값이나 사인 값에 비례하지 않고 위상에 비례하는 장점이 있다.

3. 맥놀이 주파수 천이 회로 구성

맥놀이 주파수 천이 회로를 그림 3-10-6과 같이 구성하였다. 구성된 천이회로를 통해 측정에 가장 용이한 주파수로 변화된 맥놀이 주파수를 위상 검출 회로를 통해 측정하여 가장 좋은 분해능과 불확도를 가지는 시스템을 구성한다. 동시에 양방향 계수기를 이용해 간섭 신호를 계수함으로써 거리 측정용 전자회로를 구성하였다.

4. 컴퓨터를 이용한 위상검출기의 시험 및 변위계산

그림 3-10-7은 위상검출기를 테스트하기 위한 실험장치의 개략도이다. 두 개의 파형발생기(Hewlett-Packard model 5501A)에 phase lock을 걸어 기준 신호와 측정 신호를 만들어 낸다. 이 두개의 신호를 위상검출기의 입력단자에 넣는다. 위상검출기의 출력(A, B)는 디지털 전압계(Hewlett-Packard model 34401A)로 읽어 GPIB를 통해 컴퓨터로 전달된다. 또한 위상은 GPIB를 통해 컴퓨터로 조절할 수 있게 구성하였다.

위상검출기의 분해능을 테스트하였다. 그림 3-10-8은 위상을 0.1° 씩 변화시켜 가며 출력A의 값을 그린 것이다. 위상이 0.1° 변하면 출력은 약 3 mV 정도 변하며 출력의 잡음은 약 0.3 mV 이었다. 즉, 위상분해능은 약 0.01° 이며 이는 요구 사양을 만족시키는 값이다.

그림 3-10-9는 위상을 1° 만큼씩 한 주기($0^\circ \sim 360^\circ$)에 걸쳐 바뀌가며 위상검출기의 출력을 나타낸 그래프이다. 출력은 위상값과 비례하며 출력 A는 진폭이 5 Vpp으로 설계치와 동일하나 출력 B는 진폭이 4.4 Vpp로 이에 미치지 못하고 위상이 90° , 270° 인 곳에서 파형이 약간 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 이는 출력 A와 B쪽의 전자부품의 특성이 다르고 또한 B쪽의 90° 위상지연 회로의 impedance mismatch에 의해 발생하는 문제로 생각된다.

파형의 왜곡이 적은 출력 A를 이용하여 위상을 구한다. 위상과 출력전압이 비례하므로 $0^\circ \sim 180^\circ$ 사이의 출력 A를 선형회귀하여 기울기와 y절편값을 구한다. 구한 값을 Fig. 3-1-9에 표시하였다. $180^\circ \sim 360^\circ$ 사이의 기울기와 y절편값은 대칭성을 이용하여 구할 수 있다. 기울기와 y절편값을 직선의 방정식에 대입하여 출력A를 위상으로 환산한다. 그러나 출력A만으로는 위상이 $0^\circ \sim 180^\circ$ 사이에 있는지 $180^\circ \sim 360^\circ$ 사이에 있는지를 구별할 수 없으므로 출력B의 부호를 이용하여 위상이 어느 구간에 있는지 판단하게 된다.

그림 3-10-10은 위상검출기의 정확도를 시험한 결과이다. 위상을 1° 씩 증가시켜 가며 위상검출기의 오차를 기록한 것이다. 오차는 180° 의 주기를 갖고 있으며 최대 오차는 약 5° 정도이다. 180° 의 주기를 갖는 원인은 출력A가 180° 위치에서

경사가 바뀌기 때문이라고 생각된다. 광/X선 복합간섭계에서 중요한 위상기준점에서의 오차를 살펴보면 그림 3-10-11과 같다. 그림에서 보듯이 위상기준점(360°)에서의 오차와 반복성은 위상검출기의 사양을 만족한다.

위상측정속도를 확인하기 위해 파형발생기의 기준신호를 2 MHz, 측정신호를 2.001 MHz로 하여 두 신호의 주파수 차이가 1 kHz가 되도록 하였다. 출력 A를 오실로스코프로 보면 5 Vpp, 1 kHz의 삼각파로 정확히 나오고 있음을 볼 수 있다. 따라서 위상측정속도는 1 kHz 이상임을 알 수 있다.

위상 ϕ 에 해당하는 실제 변위 d 는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$d = (\lambda/2)(\phi/360^\circ) \quad (3.10.1)$$

여기서 λ 는 빛의 파장이다. 위상 ϕ 는 0° ~ 360° 사이에 있으므로 $\lambda/2$ 이상의 변위를 측정하기 위해서 위상이 0° 또는 360° 를 지날 때마다 $\lambda/2$ 씩을 움직이는 방향에 따라 더하거나 빼준다.

5. 이동대의 변위측정

가. 실험장치 구성

실험장치는 레이저 광원과 광학계, 거울을 움직이기 위한 스테이지와 PZT, 그리고 고속 광검출기로 구성되었다. 실험장치는 honey comb구조의 방진 테이블에 설치되었으며 측정환경은 보통 실험실 조건(상온, 1기압)이다. 스테이지는 노치(notch)형태의 double rectilinear spring으로 이루어져 있어 한 방향으로만 자유도를 갖도록 설계되었다. 거울의 한쪽은 스테이지의 고정면에 부착되어 있고, 나머지 거울은 스테이지의 움직이는 면에 부착되어 PZT에 의해 선형운동을 한다. X선 간섭계가 위치할 부분에는 평면 거울로 대체하여 방진 테이블에 고정하였다.

나. 측정 결과

먼저 간섭계의 성능과 환경으로 인한 잡음 등을 알아보기 위해 거울을 정지시켜 놓은 상태로 거리를 측정하였다. 이 실험에서 위상검출기의 출력을 1 Hz로 샘플링하여 20분 동안 변위를 측정하였다. 그림 3-10-12는 이 실험의 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 전체 peak to peak 노이즈는 약 6.5 nm 이었고, 20분 동안 잡음의 평균값은 3.096 nm, 표준편차는 0.882 nm 이었다.

간섭계의 안정성을 실험하기 위해 마찬가지로 1 Hz의 샘플링 주파수로 5시간 동안 거울을 정지시켜 놓은 상태로 측정하였다. 본 간섭계와 비교하기 위해 상용 평면 미러 간섭계를 이용한 측정도 병행하였다. 그림 3-10-13은 평면거울 간섭계를 나타낸 것으로 본 간섭계와 매우 비슷하나 간섭을 만들어내는 두 광속의 경로가 광학계 내(A-B)에서만 같고 하나의 거울에 광이 2번씩 반사되므로 광학적 분해능 값은 파장/4로 본 간섭계의 2배인 점이 다르다. 측정 환경이 똑같지 않아 직접 비교할 수는 없으나 모두 보통 실험실 조건에서 측정하였으므로 대략적인 경향을 파악하는데 도움이 된다. 그림 3-10-14는 이 실험결과를 나타낸 것이다. 그림을 보면 본 간섭계가 평면거울 간섭계보다 단위시간당 drift가 각각 0.0071 nm/s, 0.0296

9nm/s로 더 작으며, 시간이 지날수록 일정한 값으로 수렴되고 있음을 알 수 있다.

그림 3-10-15는 PZT에 삼각파형을 가한 뒤 PZT의 변위를 측정된 결과이다. PZT의 행정거리는 총 1100 nm이며 삼각파형의 peak to peak 전압은 약 9 V 이므로 PZT의 sensitivity는 0.12 nm/mV 이다. PZT 변위를 나타낸 그림을 보면 한 주기가 지날때마다 다시 원위치로 돌아오지 못하는 이력현상을 볼 수 있다.

다. 오차 분석

앞 절의 실험에서 나타나듯이 레이저 간섭계를 이용한 거리측정에서는 잡음과 drift가 존재한다. 보통 실험실 환경조건에서 주로 영향을 끼치는 잡음과 drift의 원인으로서는 공기굴절을 변화에 의한 공기중에서의 레이저 파장 변화, 부품들의 열팽창, 기계적 진동(지반, 음향)등을 꼽을 수 있다. 만약 측정범위가 1 mm이고 광학계의 온도구배가 1 K이라면 공기굴절율에 의한 오차는 약 10 nm가 된다. 지반의 진동이나 음향에 의한 진동, 이외의 기계적인 진동은 방진 테이블과 덮개를 이용하여 줄일 수 있다. 이때의 가장 지배적인 잡음원으로는 온도변화에 의한 공기굴절율 변화와 열팽창으로 생각된다.

6. 위상 이중 측정법

그림 3-10-16과 같이 구성하여 광위상 이중측정을 실행하여 아래의 결과를 얻었다. 고속 측정을 위한 광원은 그림 3-10-17과 같은 방법으로 높은 맥놀이 주파수의 안정화 광원을 이용(37)하면 된다[Yokoyama 1994].

이상적인 조건인 경우를 가정하기 위해 임의 파형기를 위상 고정하여 입력하였다. 이 경우 매 단계마다 0.5°의 위상을 변화 시키며 구성한 위상 이중 검출법을 이용하여 위상을 측정하였다. 측정결과는 그림 3-10-18에서 보는 바와 같이 위상 천이를 하지 않은 경우, 즉 고주파의 맥놀이 주파수를 이용한 경우는 평균값 0.996°, 표준편차 0.096°의 결과를 얻었다. 그리고, 위상 천이를 한 경우 즉, 저주파의 맥놀이 주파수로 변환하여 측정한 경우는 평균값 0.033°, 표준편차 0.031°의 결과를 얻었다. 잡음 등을 고려하여 가우시안으로 맞춤을 하면, 위상 천이를 하지 않은 경우, 즉 고주파의 맥놀이 주파수를 이용한 경우는 평균값 0.092°, 표준편차 0.106°의 결과를 얻었으며, 위상 천이를 한 경우, 즉 저주파의 맥놀이 주파수로 변환한 경우에는 평균값 0.028°, 표준편차 0.018°의 결과를 얻었다.

실제 측정 상황에서의 결과를 보기 위해 상용 간섭계로 테이블의 한 쪽의 변위량을 측정하고 위상 이중 측정 시스템을 이용하여 측정한 결과와 직접 비교하였다. 시스템의 구성은 그림 3-10-19와 같다. 위상 천이를 한 경우, 평균값 -520.06 nm, 표준편차 352.08 nm의 결과를 얻었다. 측정 오차가 크게 나타났으나, 변위측정이 서로 다른 위치(2 m의 거리차이)에서 이루어져서 공기의 흐름, 온도 구배 등의 환경영향이 컸고, 기준 이송 가이드가 완전치 못하여 휘어 있을 경우 측정점의 위치 차이로 인한 오차가 생길 수 있고, 또 측정값의 동시 샘플링이 이루어지기가 실제로 어려운 점 등을 고려하면 충분히 있을 수 있는 정도의 오차임을 알 수 있다. 결

과적으로 이 실험을 통해 위상 이중 측정법의 기본적인 개념의 타당성을 확인할 수 있었다.

실제 미소거리 측정상황에서의 결과를 통해 그 정확도를 알아보기 위해 상용 정 전용량센서(Queensgate, 측정범위 100 μm , 분해능 0.5 nm)로 테이블의 한 쪽의 변 위량을 측정하고 위상 이중측정 시스템을 이용하여 측정한 결과와 직접 비교하였다. 1축 미세이동대를 이용하였다. 그림 3-10-20에 나타낸 측정결과에서 보듯이 위 상천이를 하지 않고 고주파의 맥놀이 주파수로 그대로 이용한 경우는 평균값 3.25 ~ 4.47 nm, 표준편차 4.98 ~ 8.21 nm의 결과를 얻었다. 그러나, 위상천이를 한 경 우, 즉 저주파의 맥놀이 주파수로 변환하여 위상을 측정한 경우에는 평균값 0.97 ~ 1.38 nm, 표준편차 1.17 ~ 2.48 nm로 약 3~4배 향상된 결과를 얻었다.

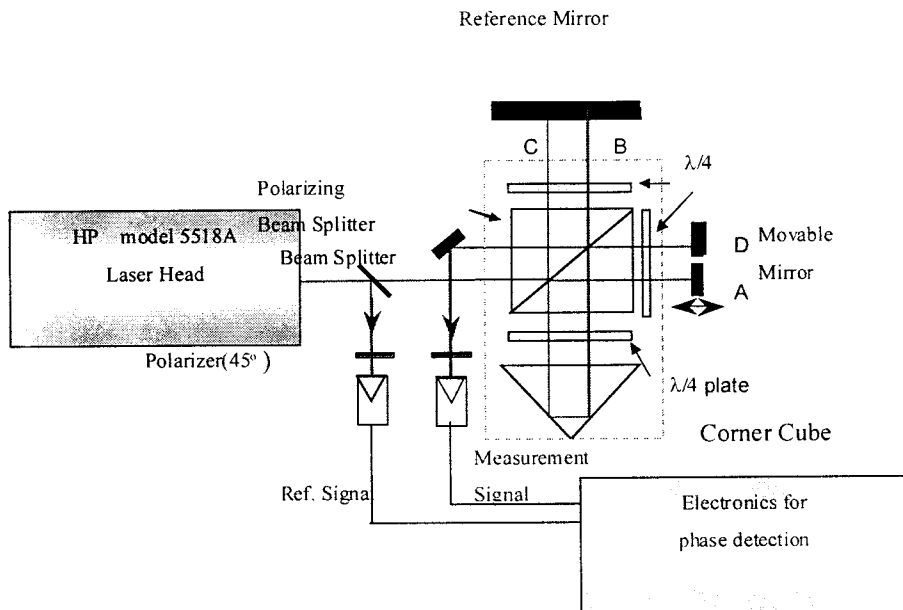


그림 3-10-1 Configuration of the laser interferometer

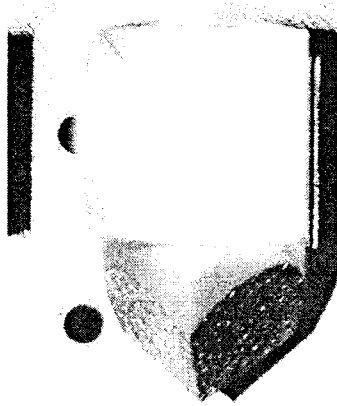


그림 3-10-2 A compact interferometer optics for the combined interferometer

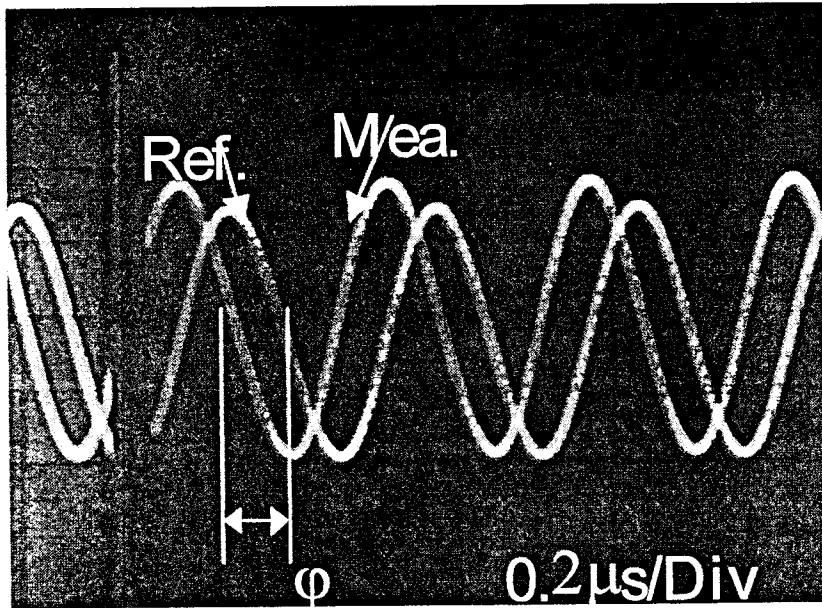


그림 3-10-3 Oscilloscope view of the reference and measurement signals
Phase difference between two signals is shown.

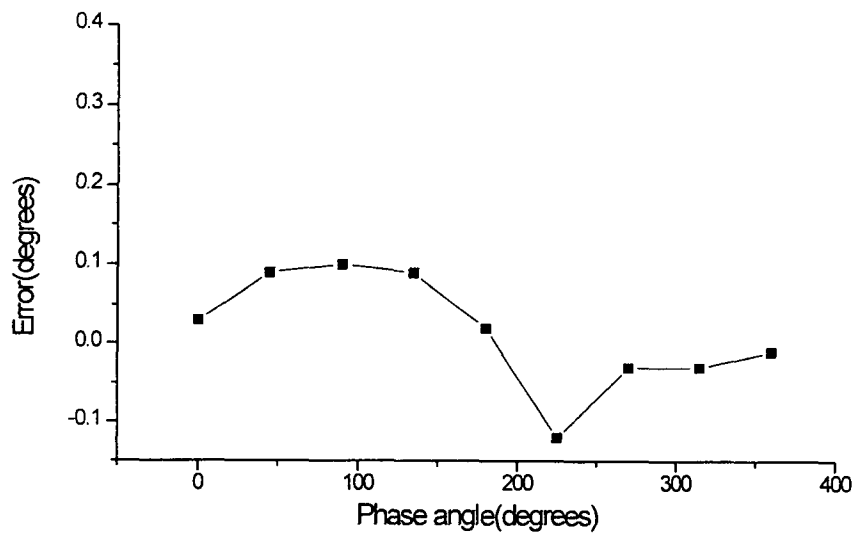


그림 3-10-4 Errors in phase measurement

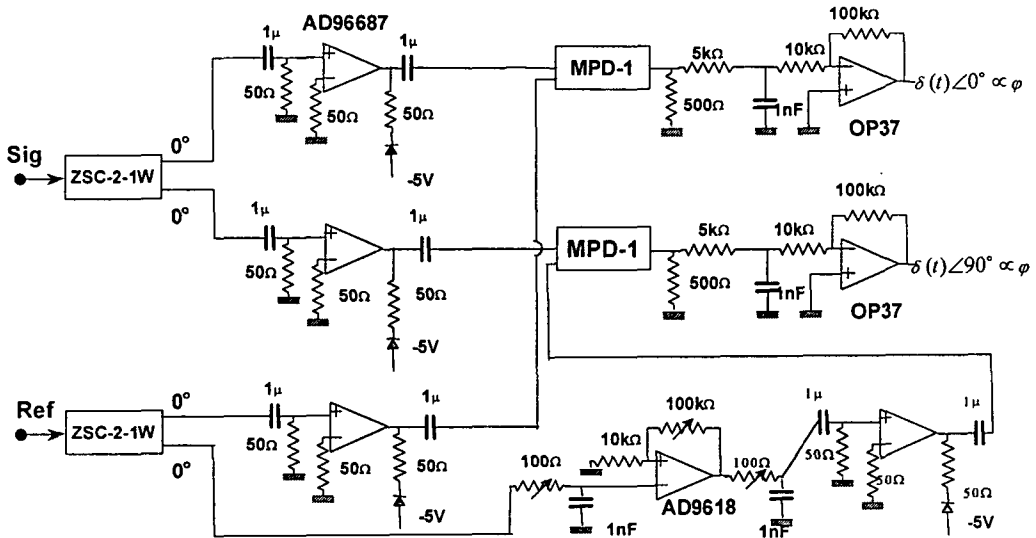


그림 3-10-5 Circuit diagram of the phase demodulator

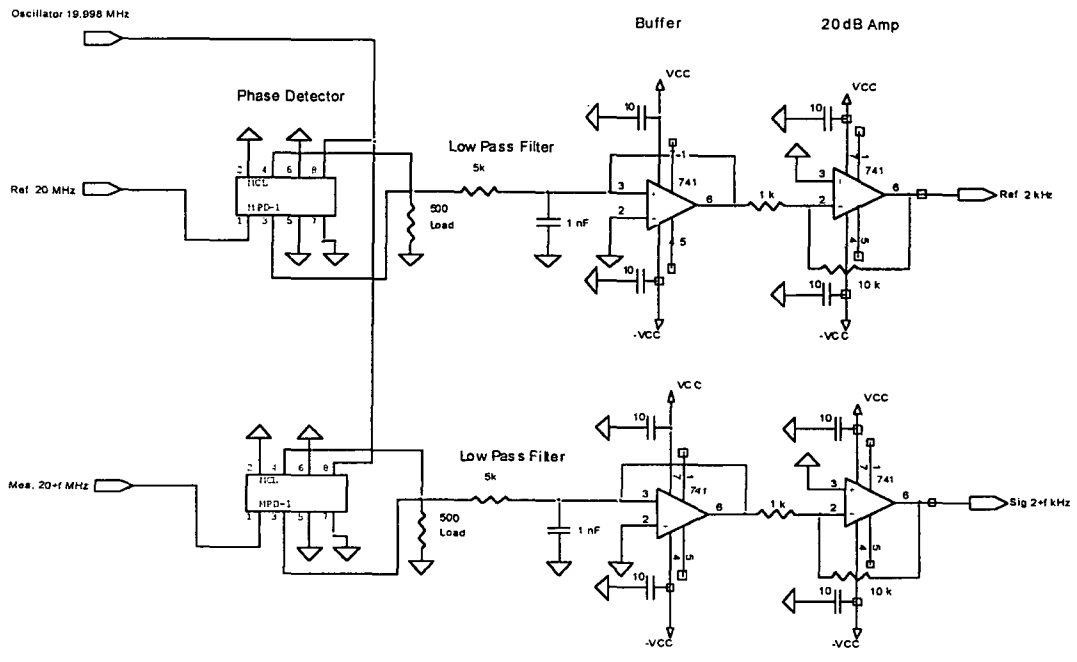


그림 3-10-6 Electronic circuit diagram for beat frequency shifter

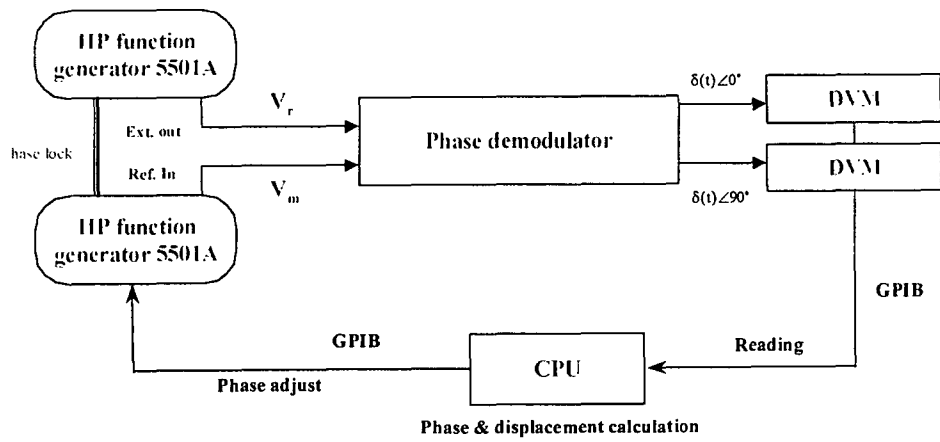


그림 3-10-7 Block diagram of phase demodulator test

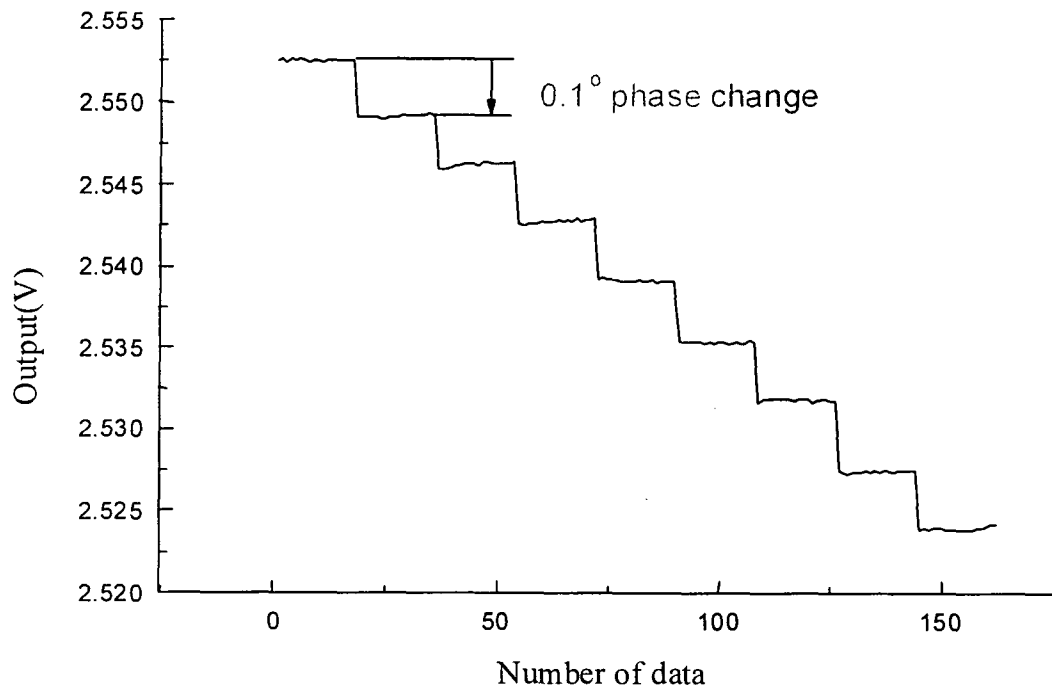


그림 3-10-8 Resolution test of the phase demodulator

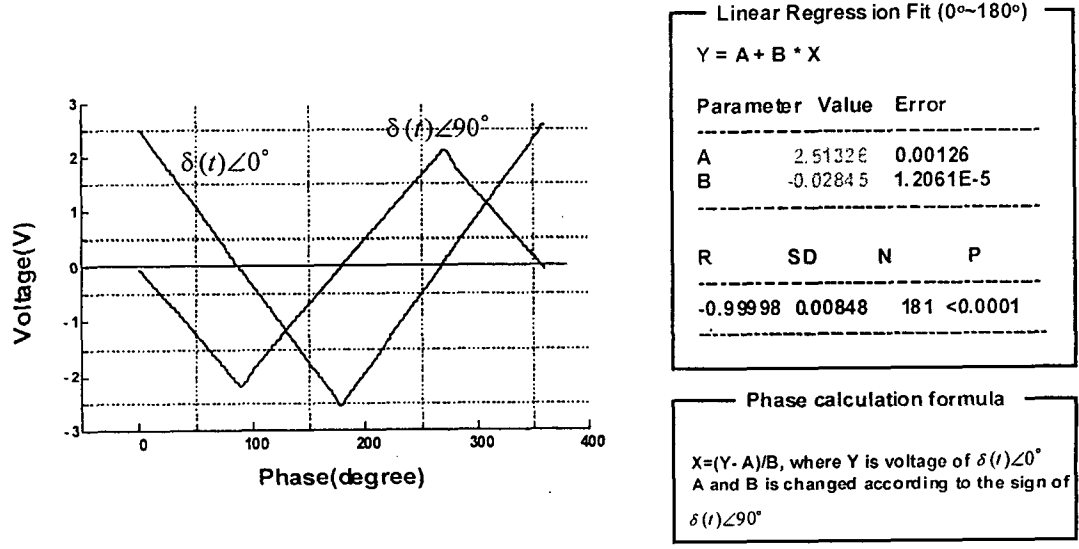


그림 3-10-9 Output of the phase demodulator

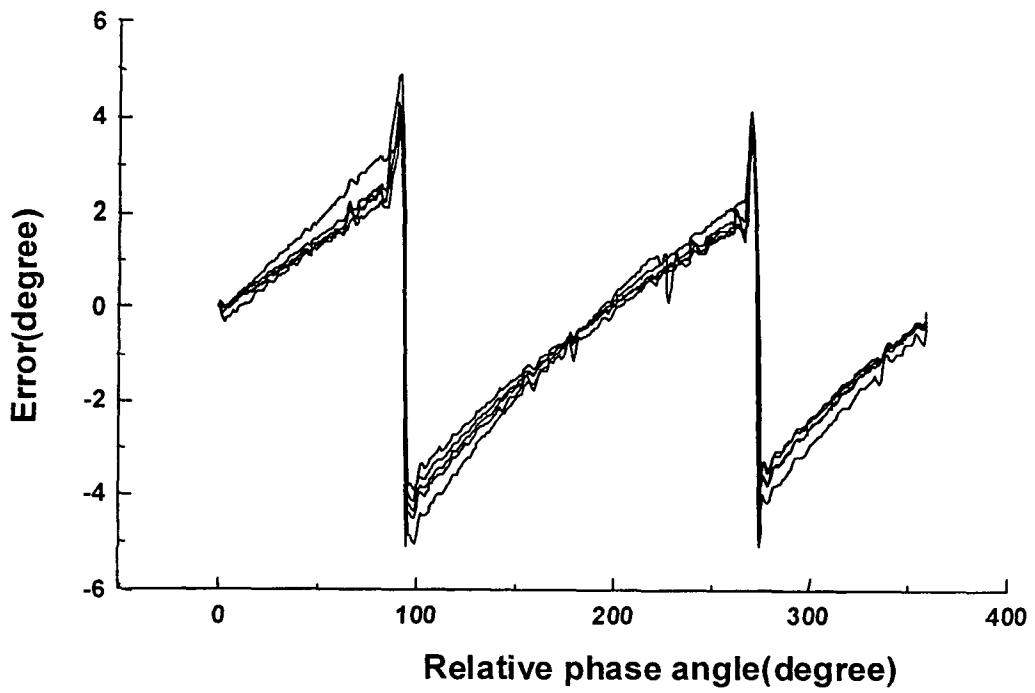


그림 3-10-10 Accuracy test of the phase demodulator

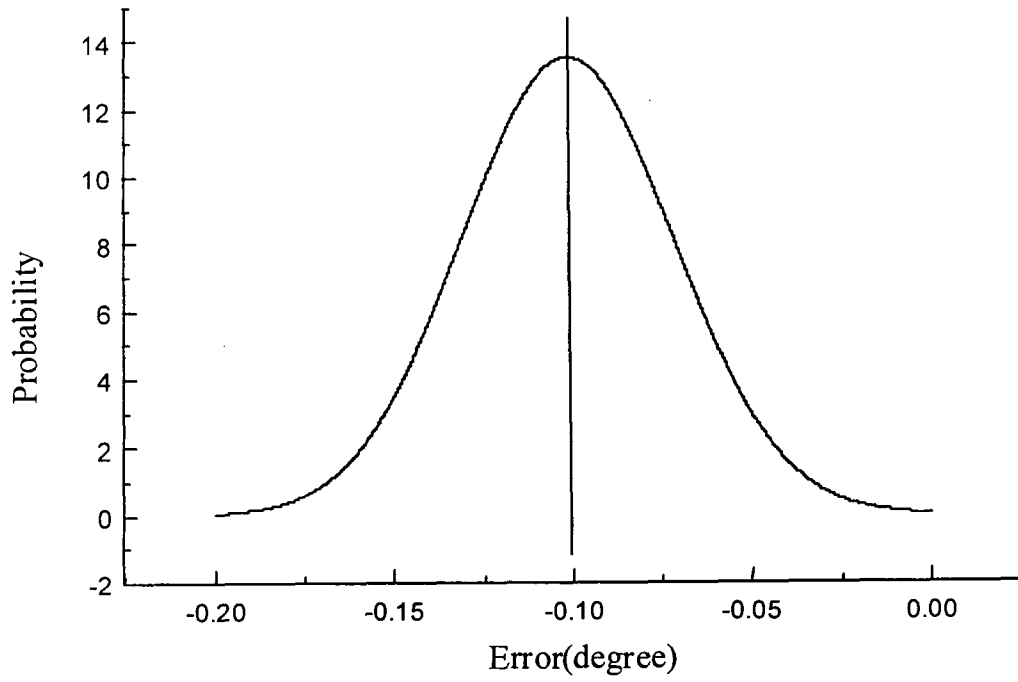


그림. 3-10-11 Accuracy test of the phase demodulator at a reference point

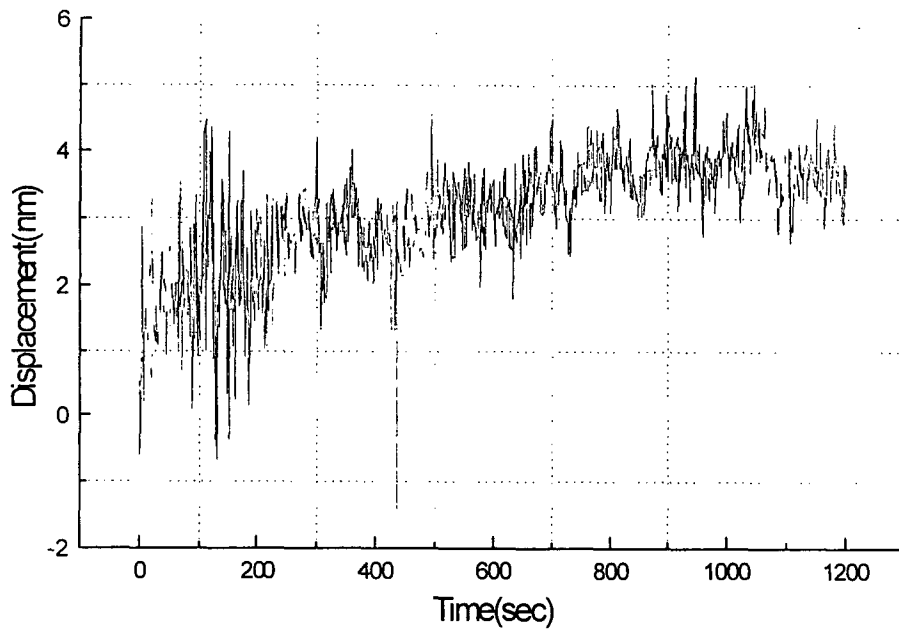


그림 3-10-12 Free run test of laser interferometer system

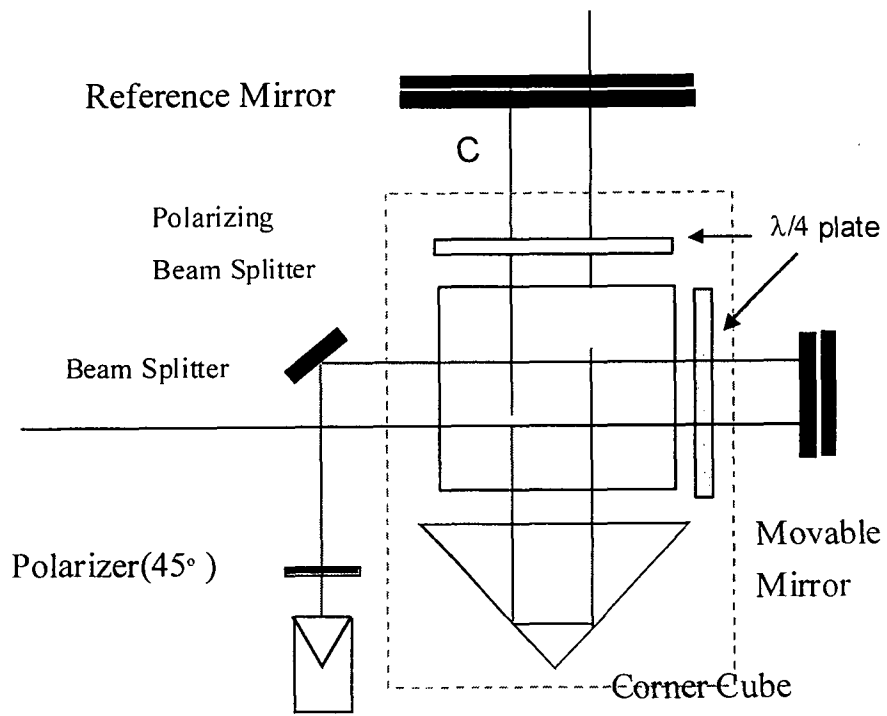


그림 3-10-13 Plane mirror interferometer

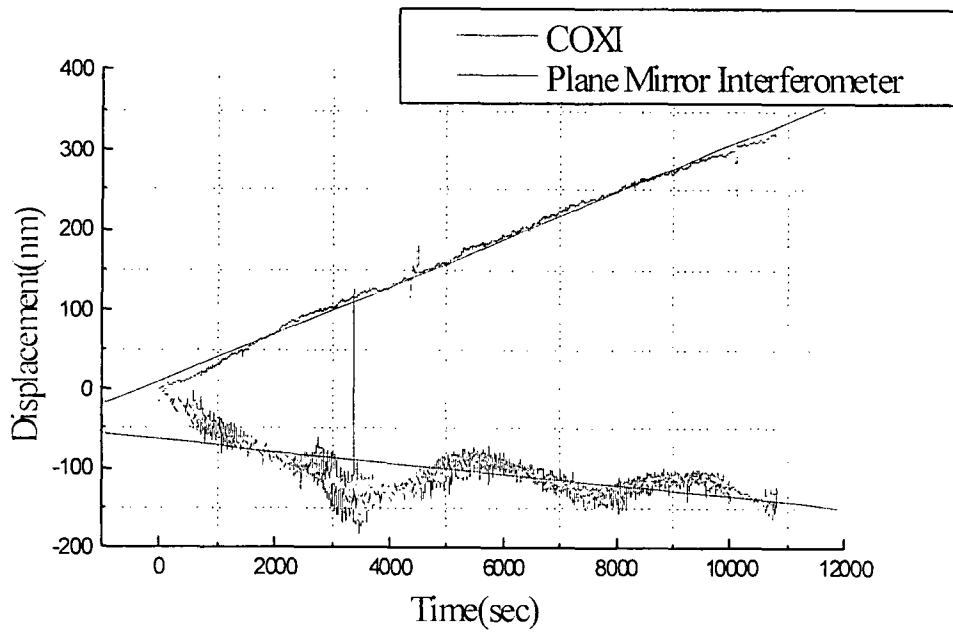


그림 3-10-14 Long term stability test

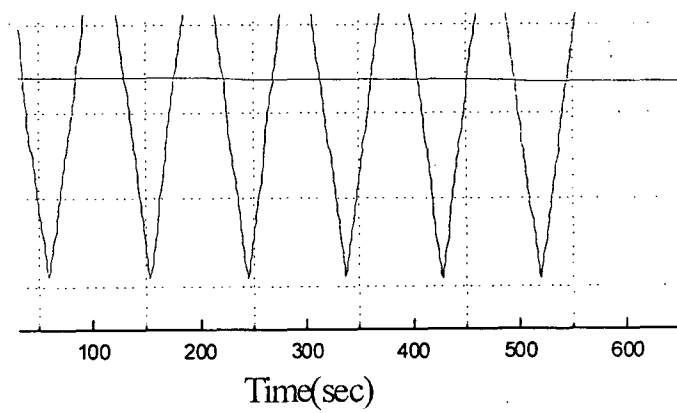
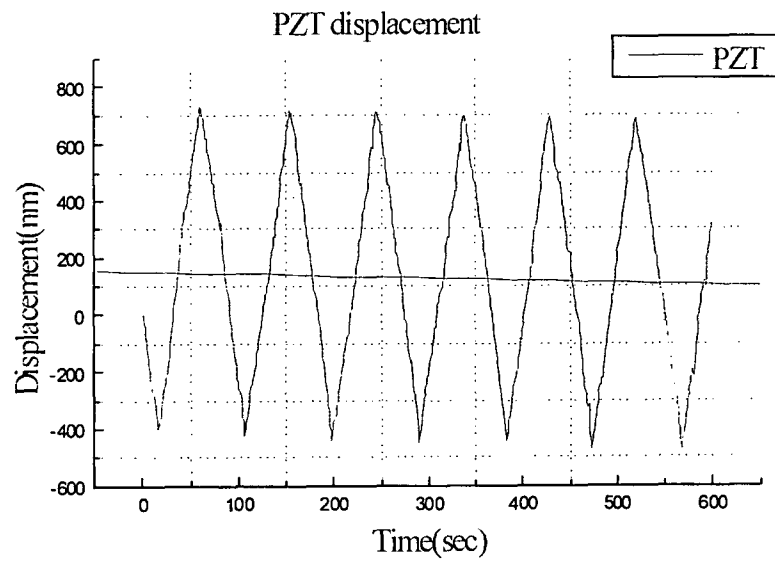


그림 3-10-15 PZT driving voltage & displacement

□ Evaluation test of phase detection methods

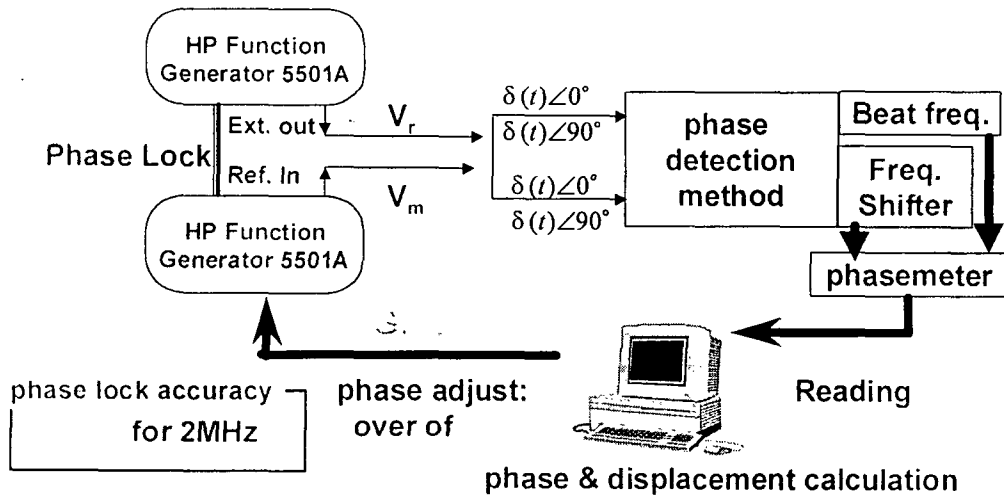


그림 3-10-16 Evaluation of the 'phase dual measurement'

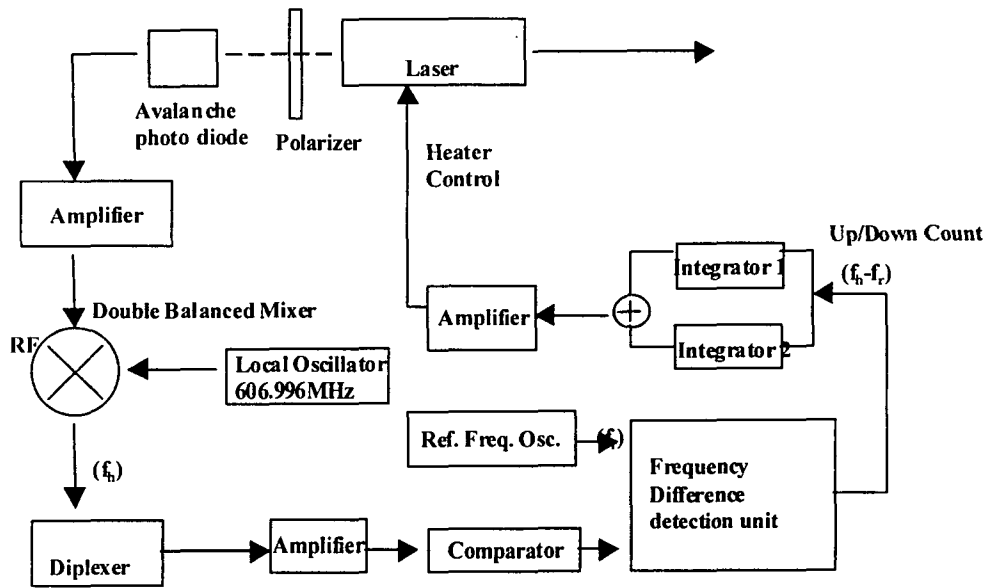
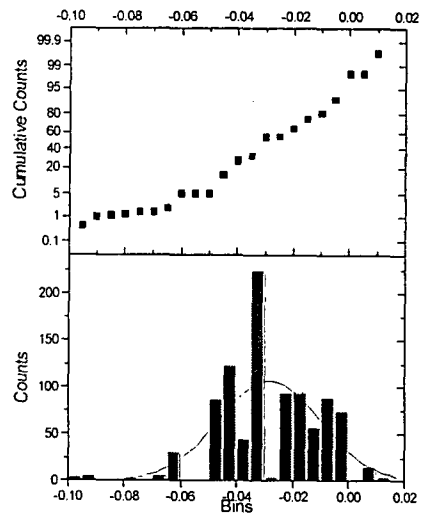


그림 3-10-17 Concept of high beat frequency laser source with high stability



(a)

(b)

그림 3-10-18 Evaluation results of phase detection
 (a) ordinary method (b) phase dual measurement

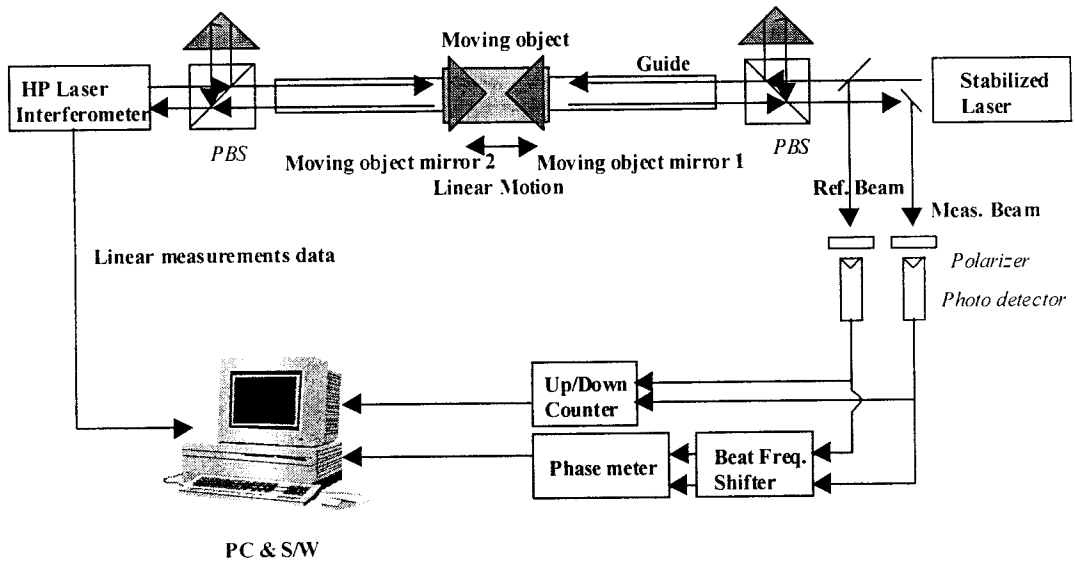


그림 3-10-19 Schematic diagram of the setup for testing the 'phase dual measurement'

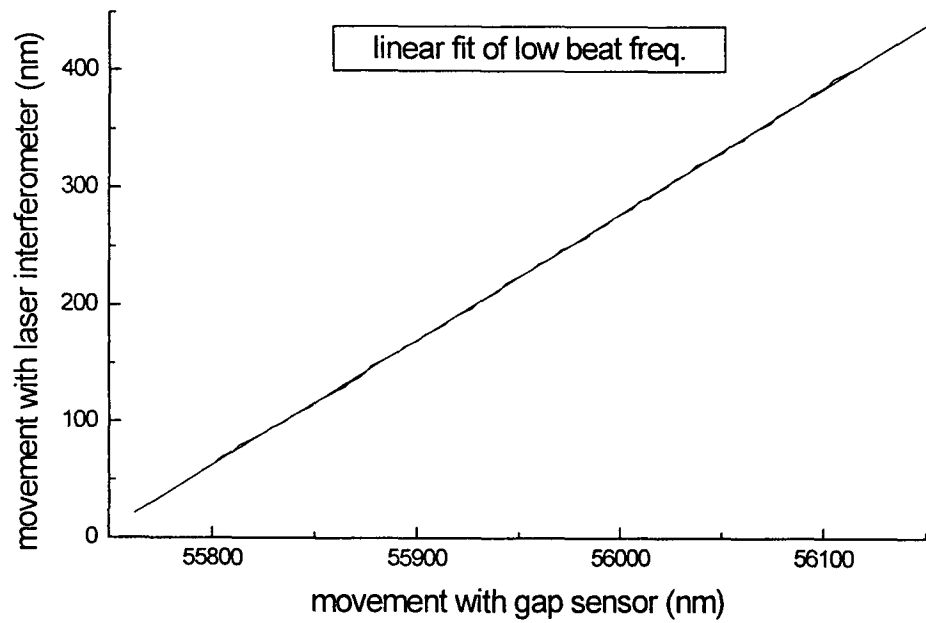
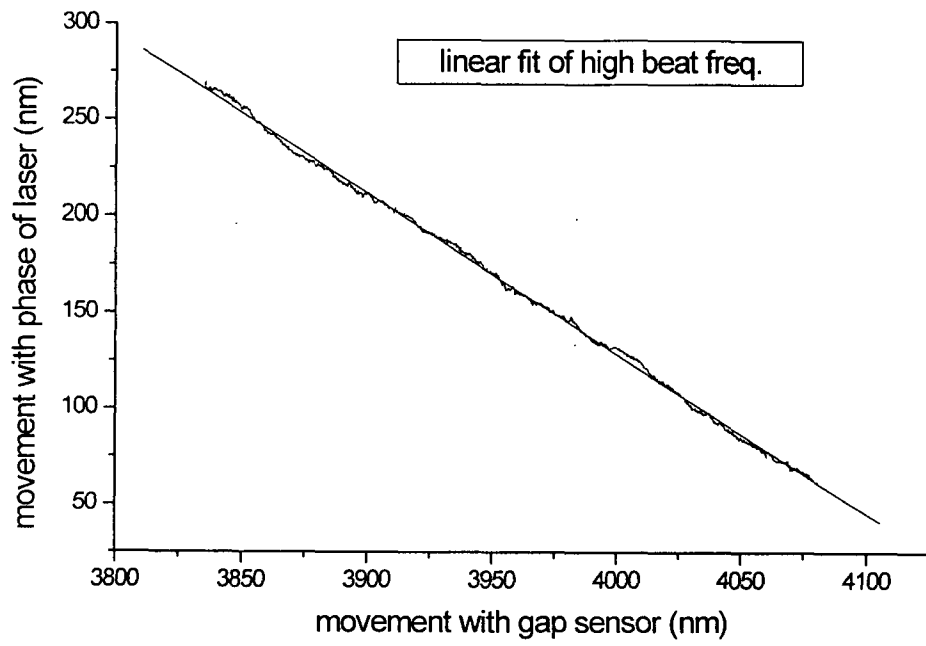


그림 3-10-20 Results of dynamic test for the 'phase dual measurement

제 11 절 광/X-선 복합간섭계 개발

최근 초정밀 길이 측정 분야에 응용되고 있는 엑스선 간섭계는 실리콘 회절 격자면의 격자간 거리 즉 격자상수를 주기로 나타나는 간섭신호를 이용하여 거리를 측정하는데[Bonse 1965], 약 0.192 nm로 알려진 실리콘의 (220)면의 격자상수는 아보가드로 상수를 결정하기 위한 실험을 통하여 매우 높은 정확도로 측정되었으며[Becker 1981], 이 값을 기준 눈금으로 이용하면 서브 나노미터의 정확도로 측정이 가능하다. 엑스선 간섭계를 이용해 표면거칠기 측정기인 Talystep과 상용 레이저 간섭계를 10 pm의 분해능으로 교정한 경우도 있다[Bowen 1990]. 하지만 엑스선 간섭계의 측정 영역이 매우 좁아서 수 μm 범위의 측정밖에 할 수 없으므로 대부분의 초정밀 길이 측정 센서의 측정 영역(수 십 μm ~ 수 백 μm)에는 미치지 못한다. 또한 엑스선 간섭계는 엑스선 검출의 특성때문에 측정속도가 느리다는 단점도 함께 가지고 있다.

광/x선 복합 간섭계는 각각의 간섭계가 가진 단점을 상호 보완하기 위해, 넓은 측정 영역을 가진 레이저 간섭계를 기준자(main ruler)로 사용하고 서브 나노미터의 정확도를 갖는 엑스선 간섭계는 내삽기(interpolator)로 함께 이용하는 것을 그 기본 아이디어로 하고 있다. 다시 말하여, 두 간섭계를 적절히 결합시킴으로써 x선 간섭계의 고분해능과 레이저 간섭계의 넓은 측정범위 및 빠른 측정속도를 함께 얻으려는 것으로서, NPL, PTB, IMGCC에서는 이에 대한 공동연구가 진행되고 있다[EC-report 1997].

1. 광/X-선 복합 간섭 시스템의 구성

복합 간섭계의 구성은 그림 3-11-1과 같다. 주요 요소는 X선 광원과 검출기, 저속 구동 PZT와 구동 전자회로로 구성되는 X선 간섭계 부분과 안정화된 광원과 광검출기, 일체식 광학부품 등으로 구성되는 레이저 간섭계 부분 및 교정 대상과 피 측정 교정 대상을 이송하며 레이저 간섭계의 측정광 거울을 움직이는 미세 구동부, X선 간섭계 부분을 움직이면서 레이저 간섭계의 기준광 거울을 움직이는 미세 구동부 그리고 환경 제어부 등으로 구성되어 있다. 광 간섭계는 두개의 측정 arm을 가지고 있는데, 한쪽은 교정 대상을 이동시키는 translation stage에 부착되고 한쪽은 X선 간섭계의 실리콘 구조물 옆면에 부착된다. 교정대상의 출력은 stage의 움직임과 동시에 측정되어 광 간섭계 신호와 같이 기억된다. X선 간섭계는 광 간섭계의 1주기 사이의 비선형 구간을 보간하는데 사용된다. 변위의 측정은 이렇게 측정된 두 교정점 사이의 위치 차이값으로 얻어진다. 측정 결과 위치값은 광 간섭계의 간섭무늬 개수와 x선 간섭계의 간섭무늬 개수 및 X선 간섭계의 fractial part의 합으로 나타난다. 광 간섭무늬는 158 nm마다, X선 간섭무늬는 0.2 nm마다 주기적으로 변화한다.

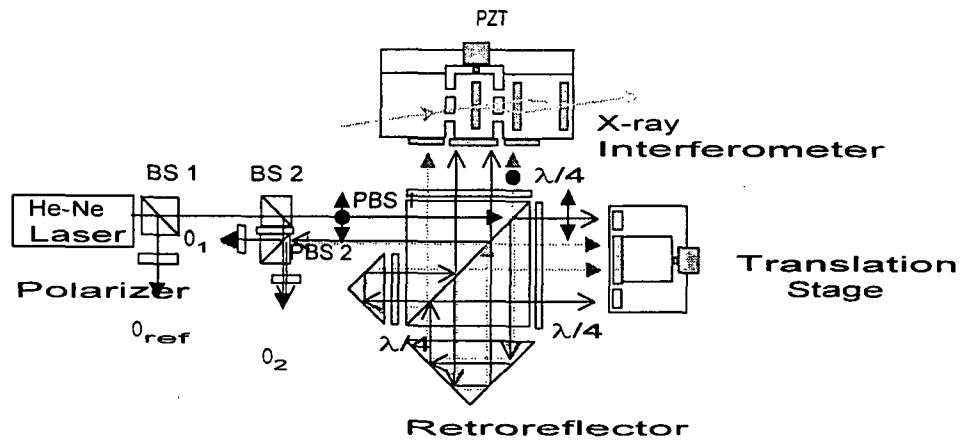


그림 3-11-1 System configuration of COXI

2. 제어 개념 및 측정 절차

서로 다른 두개의 간섭계를 같이 사용하므로 그 측정 절차와 이에 따른 제어 개념이 중요하다. 측정 절차에 따라 설명하면 다음과 같다.

(Before calibration) O_{ref} 는 광원의 안정화 정도의 범위에서 기준 신호로 안정화되어 있다. 우선 레이저 간섭계의 측정 arm에 있는 교정 스테이지에 측정 대상을 고정한다.

(Step 1) O_1, O_2 간섭 신호가 O_{ref} 와 같아지도록 움직인다. 즉 O_{ref}, O_1, O_2 세 신호의 위상이 같도록 (= zero crossing하도록) 간섭계 두 arm의 구동 PZT를 제어한다. 이때 레이저 간섭계는 자체의 분해능 한도 내에서 계속 정지 위치 값을 나타내고 있다.

(Step 2) 기준 간섭광 O_{ref} 에 O_2 를 zero crossing하도록 유지하며 교정 스테이지를 이동하여 교정 목표점까지 움직인다. 교정 대상의 신호 값과 O_1 레이저 간섭계의 위치 신호(위상) 값이 변한다 이때 O_1 레이저 간섭계의 간섭신호를 계수(Lo)하고, 교정 목표점에서의 교정 대상 신호를 기억한다.

(Step 3) 기준 간섭광 O_{ref} 에 O_2 를 zero crossing하도록 유지하며 교정 스테이지를 가장 가까운 zero crossing점으로 이동한다. 즉 $O_1 = O_{ref}$ 이 되도록 움직인다. 이제 다시 세 신호값은 zero crossing하고 있다.

(Step 4) Step 2 에서 기억한 교정 대상 신호가 나올 때까지 교정 스테이지를 이동한다. 이때 $O_1 = O_2$ 이 되도록 두 신호 간에 zero crossing을 유지하며 x선 간섭계의 구동 PZT를 움직인다. X선 간섭계의 측면에 기준광 거울이 붙어 있으므로 레이저 간섭계의 위상 값 O_2 이 O_1 과 같이 변하도록 구동하면, 두 움직임은 동일하다. 실리콘 격자가 움직이면서 나오는 X선 간섭무늬를 계수(Lx)한다.

교정 대상의 위치 값은 레이저 간섭계의 간섭신호를 계수한 거리(Lo)와 X선 간섭계의 간섭무늬를 계수한 거리(Lx)를 합한 거리가 된다.

(Step 5) 다음 교정 대상 위치까지 교정 스테이지를 이동한다. 이때 다시 O_1 레이저 간섭계의 간섭신호를 계수하고, 교정 목표점에서의 교정 대상 신호를 기억한다. 한편 동시에 x선 간섭계 부분은 Step 4에서 진행한 방향과 반대로 진행하여 기준 간섭광 O_{ref} 에 O_2 를 zero crossing하도록 한다. 다시 X선 간섭계의 간섭무늬를 계수한 거리를 확인하여 Step 4와 비교한다.

(Step 6) 기준 간섭광 O_{ref} 에 O_2 를 zero crossing하도록 유지하며 교정 스테이지를 가장 가까운 zero crossing점으로 이동하여 $O_1 = O_{ref}$ 이 되도록 움직인다. 이제 다시 세 신호값은 zero crossing하고 있다.

(Step 7) 원하는 측정이 이루어지도록 Step 2, Step 3, Step 4, Step 5, Step 6 을 반복한다.

X선 간섭계의 신호는 레이저 간섭계의 간섭신호를 내삽하는 역할을 하게 되며, 동시에 step 5 과정을 통해 정확도를 높일 수 있으며, 광 간섭계 신호 1주기를 X선

간섭 신호로 비교 할 수 있다.

이렇게 거리를 구하면 레이저 간섭계에 의해 긴 측정영역을 가지며 X선 간섭계의 분해능을 가지는 시스템이 된다. 복합 간섭계에서 X선 간섭계는 레이저 간섭계의 간섭신호를 내삽하는 역할을 하게 되며 레이저 간섭계의 특정한 한 점 (또는 위상) 즉 zero crossing점은 기준점이 된다. 따라서 이러한 복합 간섭계도 기준이 되는 특이점 전후에서 레이저 간섭계 신호의 위상 분해능과 안정성이 엑스선 간섭계의 분해능 보다 더 떨어지면 엑스선 간섭계를 사용하는 의미가 없게 된다 전체 시스템의 불확도는 레이저 간섭계의 zero crossing 점에서의 위상 불확도와 안정성에 좌우되며 분해능은 X선 간섭계의 분해능과 같아지게 된다. 현재 상용화된 레이저 간섭계(Hewlett Packard, Zygo Corp.)로는 이러한 요구를 만족시킬 수 없으므로 광/X-선 복합 간섭계에 적합한 고 분해능 레이저 간섭계의 개발이 필요하다. 광/X-선 복합 간섭 시스템에서 특정한 한 위상 기준점에서의 레이저 간섭계의 정확도와 안정성이 X-선 간섭계의 정확도 보다 떨어지면 기준 신호가 정확하지 않으므로 X-선 간섭계의 정확도를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 한 위상에서의 분해능과 불확도가 서브 나노미터인 레이저 간섭계를 구현하고자 하였다.

3. 광학계의 구조

광/X선 복합간섭계에는 환경의 변화와 진동에 강인한 안정적인 광학계가 필요하다. 레이저에서 나온 빛은 광속분할기(Beam splitter)를 지나면서 일부(33%)를 검출기로 신호를 얻는다.

$$E_1 = E_a \exp [j(2\pi f_1 t)]$$

$$E_2 = E_b \exp [j(2\pi f_2 t) - \phi]$$

검출기 앞에는 45° 방향의 편광판을 두어 직교하는 두 편광성분을 합쳐 간섭이 일어나게 한다. 이 빛을 고속 광검출기로 받으면 두 빛의 주파수 차이로 인한 맥놀이 신호가 만들어진다. 이 신호를 기준 신호 O_{ref} 로 사용한다.

$$O_{ref} = E_a^2 + E_b^2 + 2E_a E_b \cos [2\pi(f_1 - f_2) t + \phi]$$

통과한 광(67%)중 절반은 광속분할기(Beam splitter)를 지나면서 일부(33%)를 반사하고 나머지(33%)는 통과한다. 통과한 광은 편광광속분할기 PBS1에서 편광 방향에 따라 나뉘어져 수평 편광 성분 E_1 은 편광광속분할기를 통과하여 교정 대상이 부착된 거울(A)로 향하고 수직 편광 성분 E_2 은 X선 간섭계에 부착된 거울(a)로 향한다. 수평 편광 성분은 $\lambda/4$ 판을 지나면서 원편광으로 바뀐다. (A)에서 반사된 광은 다시 $\lambda/4$ 판을 통과하면서 수직 편광으로 바뀐다. 수직 편광은 편광광속분할기에서 반사되므로 광은 corner cube로 들어가게 된다. 마찬가지로 경로사이에 놓여진 $\lambda/4$ 판을 두 번 지나고 편광상태가 90° 변하여 편광광속분할기를 투과하여 거울(B)를 거쳐 거울(C), 거울(D)로 가게 된다. 편광방향에 따른 두 광속의 경로는 각각 A-B-C-D, a-b-c-d이다. 일체식 간섭계에서 나온 광을 E_1^r , E_2^r 라 하면

$$E_1^r = E_c \exp [j2\pi(f_1 t + 2d_1/\lambda)]$$

$$E_2^r = E_d \exp [j2\pi(f_2 t - \phi + 2d_2/\lambda)]$$

E_1^r , E_2^r 은 다시 편광광속분할기 PBS2에서 초기에 갈라진 후 $\lambda/2$ 판을 통과하면서 편광방향이 바뀐 두 광(E_2 , E_1)과 편광판에서 합쳐져 측정 맥놀이 신호 O_1 , O_2 가 만들어 진다.

$$O_1 = E_c^2 + E_b^2 + 2E_cE_b \cos [2\pi\{(f_1-f_2) t + 2d_1/\lambda + \phi\}]$$

$$O_2 = E_a^2 + E_d^2 + 2E_aE_d \cos [2\pi\{(f_1-f_2) t - 2d_2/\lambda + \phi\}]$$

이 때 측정 신호는 광경로차에 의해 기준 신호와 위상차가 발생한다. ‘기준 신호와 측정 신호를 위상검출회로에 넣어 위상차를 측정한다. ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 를 O_{ref} 와 O_1 , O_{ref} 와 O_2 , O_1 과 O_2 사이의 위상 차이라 하면 다음과 같이 나타난다.

$$\rho_1 = 4\pi d_1/\lambda$$

$$\rho_2 = 4\pi d_2/\lambda$$

$$\rho_3 = 4\pi (d_2+ d_1)/\lambda$$

제작된 간섭계는 $\lambda/4$ 판, 편광광속분할기, corner cube를 모두 붙여 부피를 작게 하였을 뿐 아니라 광학부품들의 상호 진동으로 인한 간섭신호의 진폭변화 등을 억제하여 안정성을 높였다. Corner cube 뒷면에는 알루미늄 코팅을 하여 광이 corner cube를 맞고 나올 때 편광이 유지되도록 하였다.

구성된 간섭계의 특징을 알아보면 다음과 같다.

1) 마이켈슨 방식의 헤테로다인 간섭계이다. 따라서 호모다인 간섭계보다 쉽게 0.1° 의 위상 분해능을 구현할 수 있으며 측정 환경에 강인하다. 광학적인 분해능은 $\lambda/4$ 로 거울이 $\lambda/4$ 의 거리만큼 움직일 때 360° 만큼 위상이 변한다.

2) 간섭을 일으키는 두 광이 거의 동일한 경로를 진행하므로 온도변화, 진동, 공기 굴절을 변화에 민감하지 않다. Common optical Path를 가지는 differential heterodyne 간섭계이다.

3) 광학부품을 모두 접합하여 compact하게 구성하였기 때문에 부피가 작고 외부 진동에 대해 안정적이다.

4. 위상측정회로의 구성

측정 원리에 따른 위상 측정에서 고려할 점은 위상 분해능과 측정 속도이다. 광/X선 간섭계는 서브 나노미터의 정확도와 분해능을 목표로 하므로 위상 분해능은 적어도 0.1° 가 요구되며 위상기준점 근처(위상이 0° 와 360° 부근)에서는 0.1° 의 정확도가 필요하다. 여러 가지 위상 측정 방법을 비교검토하여 위상 측정 회로를 구성하였다.

5. 광학계의 신뢰성 평가

설계된 광학계의 이송중 측정값의 신뢰성을 평가하기 위하여 다음과 같이 광학계의 일부에서 측정신호를 얻고 또한 0.1nm 분해능을 가진 정전용량센서를 부착하여 이송 거리와 비교하였다.

전술한 것처럼 O_1 와 O_2 사이의 위상차 ρ_3 와 구성도의 O_{ref} 와 O_3 의 위상차 ρ_4 는 동일하다. 또한 O_{ref} 와 O_1 사이의 위상차 ρ_1 가 나타내는 거리와 정전용량 센서

에서 얻는 이송거리는 동일하다. 따라서 각각의 측정 신호값을 비교하여 광학계의 신뢰성을 평가하였다. 측정결과 ρ_3 와 ρ_4 는 표준편차 1.575nm, 선형성 99.97%로 나타났다. 측정값에서의 phase unwrapping 문제로 인한 오차부는 제외하였다. ρ_1 이 나타내는 거리와 정전용량 센서의 측정값은 표준편차 2.992nm, 선형성 99.72%로 나타났다. 광 간섭계의 신호에는 공기 유동 및 온도변화에 의한 영향 등이 실리므로 차이가 있을 수 있다.

6. 측정환경의 평가 및 설정

측정 환경의 영향을 평가하기 위하여 구성된 광학계를 이송하지 않고 정지한 조건에서 움직임을 측정하였다. 진동과 공기 유동을 차폐한 조건에서 온도의 영향을 측정하였다. 진동과 공기 유동의 차폐는 상대적으로 쉽기 때문이다. 측정결과 온도의 변화에 따라 정지한 조건에서도 광 간섭 신호가 변화하며 그 변화경향성이 온도 변화와 일치하고, 정전용량 센서로 거리를 측정한 결과값과 비교하여 실제 거리가 변화함을 확인하였다. 또한 온도의 변화를 0.01°C 이내로 유지하여야 온도 변화에 의한 움직임이 0.1 nm 이내임을 확인하였다. 적절한 보온재를 이용하여 이중구조의 차폐 구조에서 목표한 온도를 얻을 수 있음을 확인하고 이에 따라 측정환경을 다음과 같이 구성한다.

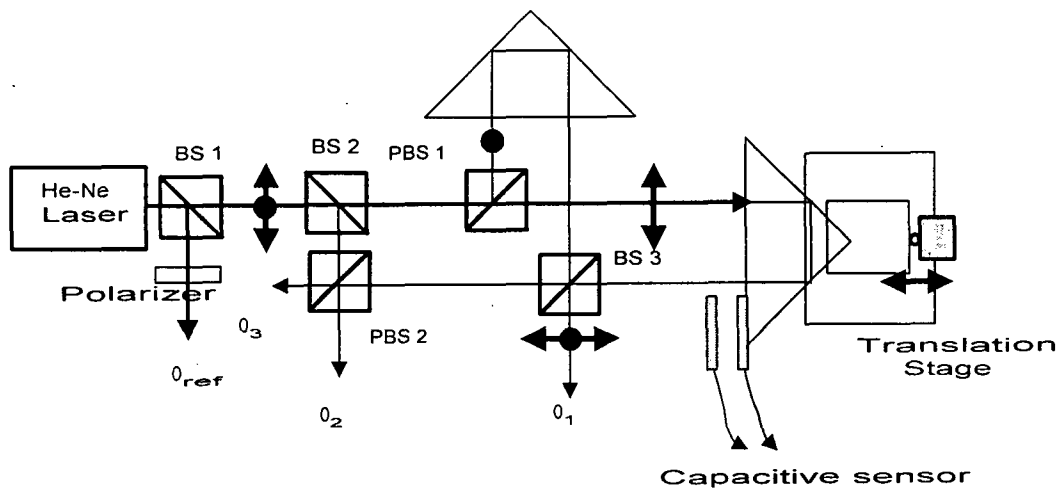


그림 3-11-2 Setup for interferometer test

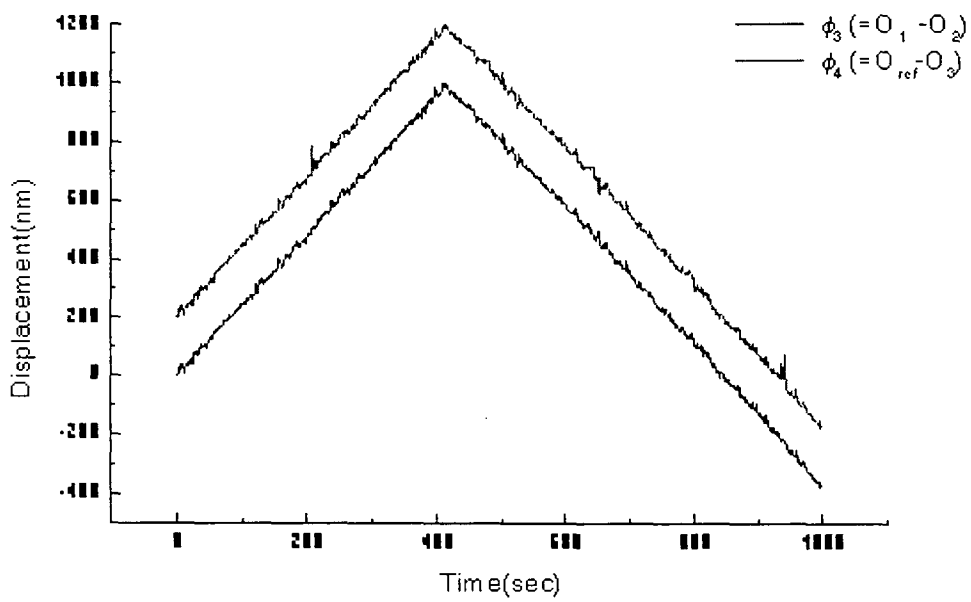
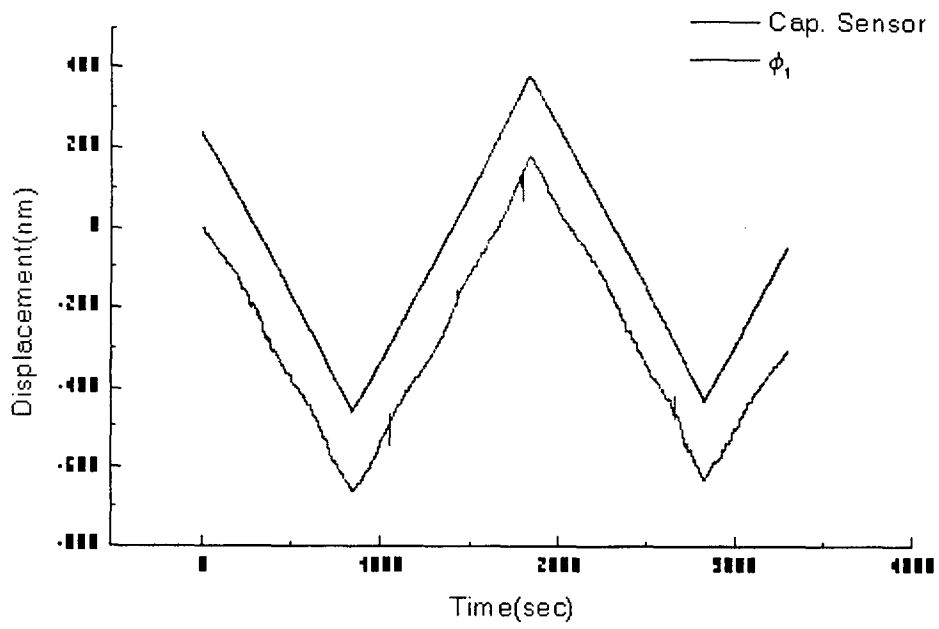


그림 3-11-3 Results of performance test

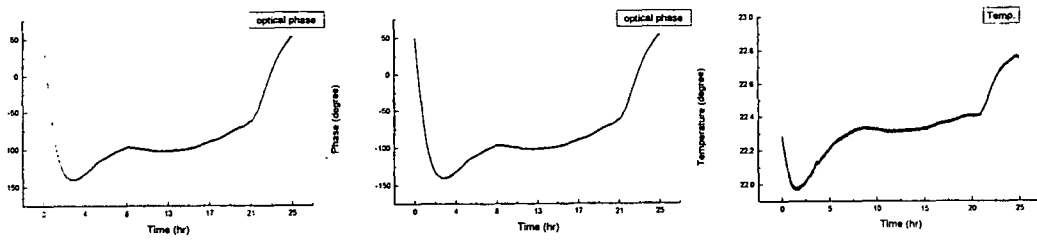


그림 3-11-4 Effects of temperature variation

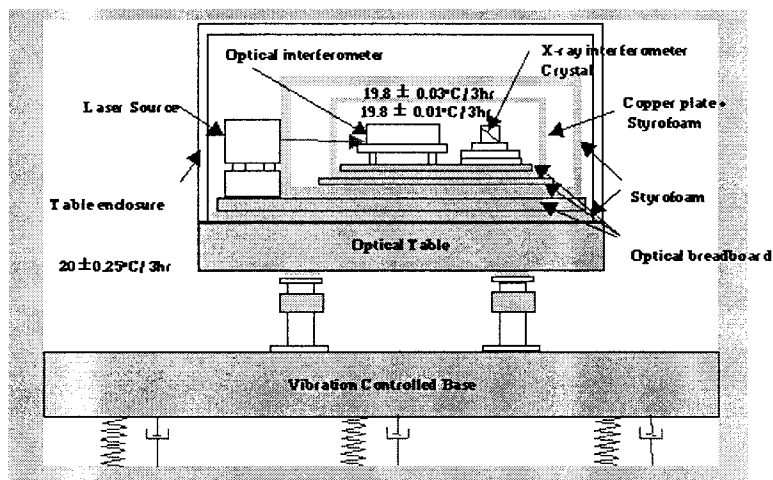


그림 3-11-5 Design of environmental chamber for COXI

제 4 장. 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

1. 1차년도 연구 목표 및 평가 착안점에 입각한 달성도 및 관련분야 기술발전 기여도.

연구개발목표	lithography용 AFM system 개발. 100 nm lithography 공정. 2축 미세 이동 장치
평가의 착안점	100 nm AFM lithography 수행. (lithography pattern의 선형도 및 선폭) 50 nm NSOM lithography 용 hole의 제작. 2축 미소 구동장치의 제작.

가) 제 1 세부과제

nanolithography용 AFM 제작을 위하여 분해능이 더 좋은 방법인 tapping mode AFM을 개발하였으며 이를 사용하여 100 nm 급의 선 제작. 그리고 이를 절단할 수 있는 scanning potentiometer를 제작하였다. 특히 Si 시료의 경우 tip을 사용한 oxidation 공정으로 10 nm 급의 SiO line을 제작하여 목표 달성을 하였다. 또한 제작된 시료의 동작특성과 failure를 조사하기 위하여 scanning potentiometer 위의 동작중인 소자의 bias distribution을 조사할 수 있게 되어 고집적 IC 회로의 오동작을 검사할 수 있는 tool이 개발되었다. 이러한 연구 결과는 nanolithography 뿐만 아니라 반도체 소자의 미세한 오동작 원인도 규명할 수 있어서 이 분야 연구에 상당히 큰 기여가 있을 것으로 기대된다.

나) 제 2 세부과제

AFM을 이용한 direct writing의 가장 큰 단점은 throughput이 느리다는 점이다. 이러한 점을 고려하여 제 2 세부과제에서는 throughput이 비교적 빠른 resistor를 찾아서 lithography를 시도하였다. 즉, SOG를 사용하여 AFM으로 lithography를 시도한 결과 scan speed가 128 $\mu\text{m}/\text{s}$ 에서도 line width가 80 nm인 좋은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 direct writing에 의해서도 상당히 빠르게 nanoscale lithography가 가능함을 시사하는 좋은 결과이다.

다) 제 3 세부과제

nanometrology를 위한 2축 구동 장치의 개발 및 오차 측정에 관한 연구는 2축 미소 이동장치의 설계 제작이 완료되었고, 또한 운동 오차 측정도 완료되었다. 선형성 측정을 위한 정전용량 센서 제어부를 제작 증으로서 2차 연도에 완성이 될 것

으로 판단되었다.

연구개발 목표	AFM lithography용 software의 개발. Alignment 오차를 10 nm 수준으로 개선. 다양한 AFM lithography용 resistor 개발. 양산성을 위한 FEA lithography system 개발. 선폭 0.1 μm 이하의 1-D wire 제작 및 특성 조사. 구동범위 100 μm \times 100 μm 이고, 불확도가 3 nm 인 2축 미소 구동 장치의 설계, 제작.
평가의 착안점	AFM으로 복잡한 pattern의 lithography 구현. 1-D wire 제작 및 특성 분석. FEA를 이용한 lithography의 초기 system 구축. 고감도 resistor 발굴. 제작된 2축 미세 이동 장치의 운동 오차.

전반적으로 AFM을 이용한 writing 공정의 확립, 진단 방법의 개발, 그리고 위치 제어가 동시에 상호 보완적으로 진행되어 nanolithography의 기초가 마련되어 미세 구조 소자 제작에 큰 기여를 할 수가 있다고 판단되었다.

2. 2차년도 연구 목표 및 평가 착안점에 입각한 달성도 및 관련분야 기술발전 기여도.

가) 제 1 세부과제

제 1 세부과제에서는 1차년도에서 제작된 TM AFM을 사용하여 금속산화법과 금속 표면을 tip으로 긁는 두 가지 방법으로 1-D wire를 제작하였다. 금속산화법은 산화의 불균일성으로 인하여 선형도가 떨어지는 단점이 있었으나 긁는 방법으로는 균일한 100 nm 급의 1-D wire의 전기적 특성을 얻어 에너지 장벽의 크기에 대한 정보도 얻었다.

한편 1차년도에 제작한 scanning potentiometer의 성능을 개선하여 표면의 전하 밀도를 조사할 수 있는 새로운 방법인 DC EFM을 개발하였다. 이 방법을 활용하여 강유전체의 domain 구조와 domain reversal 등을 조사하여 강유전체의 특성을 분석할 수 있는 새로운 길을 열었다고 판단된다. 아울러 강유전체에 domain reversal 방법으로 서울대 logo 등 복잡한 pattern을 식각하여 강유전체의 memory 기능을 보였다. 한편 새로 개발된 DC EFM 방법을 특허 신청하였다. 이 연구는 강유전체 응용에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

나) 제 2 세부과제

제 2 세부과제에서는 PMPMA resistor와 poly(MMA-BPMA-MAA) 등 여러 가지 새로운 resistor를 사용하여 선폭 100 nm 이하의 1-D wire를 제작하였다. 또한 high throughput을 이루기 위하여 FEA를 이용한 lithography를 시도하였는데, SAL-6이 resistor 위해 전자를 field emission 시키는 방법을 시도하였다.

이러한 결과는 N×N array lithography를 하기 위한 기초 단계로 큰 의미를 지닌다고 볼 수 있다.

<p>연구개발목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidation 및 plowing 방법으로 10 nm 급의 pattern 제작. - PZT cantilever를 사용한 high throughput lithography 기초 연구. - EFM을 활용한 nanolithography 방법. - FEA를 이용한 lithography system 개발. - 다양한 resistor의 개발. - 3축 미세이동장치 개발.(이동범위 100 μm, 불확도 3 nm) - 광/엑스선 복합 간섭계를 이용한 시스템 평가.
<p>평가의 착안점</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 10 nm 급 선폭의 구현. - SPM을 활용한 새로운 nanolithography 방법의 개선 여부. - ODMS의 AFM lithography 공정 확립. - FEA system 구축. - 미세이동장치의 성능 평가 결과. - 복합 간섭계 완성 여부. - 논문 등 연구 성과 유무.

다) 제 3 세부과제

이동범위 100 μ m인 2축 미세이동 장치를 설계, 제작하였으며, 측정 장치로는 laser/x-ray 복합 간섭계를 개발중이다. 목표했던 성능을 얻을 수 있었으나 측정 장치에 대한 평가가 아직 진행중이었다. 그리고 lithography와 직접 결합되어 사용될 수 있는 3축 미세이동 장치의 제작에 필요한 기반 연구가 완료되었다. 전반적으로 위치제어 및 다양한 lithography의 기법이 개발되어 nanoscience 구현에 큰 기여를 할 수 있는 결과가 나왔다.

3. 3차년도 연구목표 및 평가 착안점에 입각한 달성도 및 관련 분야 기술 발전 기여도

가) 제 1 세부과제

제 1 세부과제에서는 2차년도에서 개발된 dynamic contact mode electrostatic force microscope(DC-EFM) 방법을 이용하여 FRAM등 응용가능성이 높은 강유전체의 domain reversal을 이용한 nanolithography와 domain relaxation 등에 관한 연구를 계속 수행하였다. 또 DC-EFM 방법을 활용하여 탐침과 시료 사이의 전기 용량의 변화를 조사함으로써 시료의 doping profile과 시료 표면에 trap된 전하를 읽을 수 있는 scanning capacitance microscope(SCM)을 시도하였다. 그 결과 SCM으로 trap된 전하를 읽을 수 있을 뿐만 아니라 MIS 구조의 경우 charge trapping이 가용함을 보여 새로운 기억 소자의 변위를 조사하는 보통의 optical 방법 대신 piezo cantilever를 사용하여 cantilever의 변위를 조사할 수 있는 방법을 시도하였다. 이 방법은 multi-array를 사용할 수 있는 기초가 되는 연구로서 그 중요성이 있다.

나) 제 2 세부과제

AFM이 가지는 low through put rate로 인한 문제점을 해결하기 위하여 FE-tips를 사용한 multi-tip lithography system을 독자적인 방법으로 제작하였으며, 이를 통하여 SAL601 및 EBR-9 resist 물질에 대한 Line pattern을 획득하였다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 multi-tip lithography system에 대한 가능성을 충분히 입증한 결과로 사료된다. 또한, 이는 당해연도 연구개발 목표에 충분히 부합되는 결과로 사료된다.

다) 제 3 세부과제

제 3 세부과제에서는 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 급의 큰 기판에서 3 nm 급의 불확도를 지닌 3축 미세이동장치를 완성하였다. 이를 위하여 레이저/엑스선 복합 간섭계를 제작 부착하여 위치 제어가 될 수 있도록 하였다.

이상의 결과를 보면 이 극미세 식각 및 석판 기술 개발 과제에서는

- i) 다양한 lithography 기술의 개발,
- ii) 다양한 메모리 기능 소자 가능성의 제시,
- iii) 10 nm 급 lithography의 구현,
- iv) high throughput 기술의 개발,
- v) 정밀 위치제어 기술의 개발,

등 nanolithography에 대한 기본 기술 및 공정 기술 개발을 이룩하였다. 아울러

주요 개발된 기술은 외국 특허 신청을 하여, 개발된 기술의 수준을 짐작할 수 있다.

4. 발표 논문 및 결과

[발표논문 list]

"Construction of Magnetic Force Microscopy and its Application to Magnetic Multilayer Film", B. I. Kim, J. W. Hong, J.I. Kye, Z.G. Khim, and Seokwon Yoon, J. Kor. Phys. Soc. (Proc. Suppl.) 31, S79 (1997)

"Effect of electrostatic force and tapping mode operation of atomic force microscope", J. W. Hong, B. I. Kim, J. I. Kye, and Z.G. Khim, J. Kor. Phys. Soc. (Proc. Suppl.) 31, S83 (1997)

"Detection and control of ferroelectric domains by an electrostatic force microscope", Hong JW, Kahng DS, Shin JC, Kim HJ, Khim ZG, JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY B 16: (6) 2942-2946 NOV-DEC 1998

"Noninvasive Probing oninvasive probing of high frequency signal in integrated circuits using electrostatic force microscope" Hong-JW, Khim-ZG, A.S.Hou,Park-SI Review of Scientific Instruments 1997, Vol 68, Iss 12, pp 4506-4510

"Lithography by tapping-mode atomic force microscopy with electrostatic force modulation" Kim-BI, Pi-UH, Khim-ZG, Yoon-S Applied Physics A 1998, Vol 66, S95-S98

"Surface charge density and evolution of domain structure in triglycine sulfate determined by electrostatic-force microscopy", J. W. Hong, K. H. Noh, Sang-il Park, S. I. Kwun and Z. G. Khim, Phys. Rev. B58, 5078 (1998)

"Measurement of hardness, surface potential, and charge distribution with dynamic contact mode electrostatic force microscope", Hong JW, Park SI, Khim ZG, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 70: (3) 1735-1739 MAR 1999

"Nanometer scale lithography at high speeds with the atomic force microscope using spin on glass", S.W.Park, H.T.Soh, C.F.Quate, S.I.Park, Appl. Phys. Lett. 67(16) 16 October, pp2415-2417, 1995

"Phenomenon Analysis for AFM Lithography using SOG as a resist material", C.H.Choi, S.H.Lee, S.G.Kim, J.H.Choi, S.W.Park, The Second Asian STM Conference", The Second Asian STM Conference, Aug. 1996, Seoul Korea.

"AFM lithography에 있어서 SOG Resist의 특성분석에 의한 공정 여유도 개선", 최창훈, 이상훈, 김수길, 최재혁, 박선우, 한국진공학회 Vol 5, No. 4, Dec, 1996, pp 309-314

"Spin-On Glass를 이용한 AFM lithography에서 FE 전류와 패턴과의 관계", 최창훈, 이상훈, 김수길, 최재혁, 박선우, 한국진공학회 제11회 학술발표회, III-8, pp118-119, Jun 1996

"Nanometer-scale Lithography of Langmuir-Blodgett Films with Atomic Force Microscope", 이해원, 김진철, 이유미, 김응렬, 신용우, 박선우, The Eighth International Conference on Organized-molecular Films, August 24-29, 1997, Asilomar, California, U.S.A.

"Characteristics of Low Energy Electron Beam from Electron Beam Microcolumn Aligned by STM", J.Y.Park, H.J.Choi, Y.Kuk, Y.J.Lee, S.H.Kang, K.J.Chun, S.W.Park, 한국물리학회지, Vol. 31, July 1997, pp51-53

"Construction of STM Aligned Electron Field Emission Source", J.Y.Park, H.J.Choi, Y.Lee, S.Kang, K.Chun, S.W.Park, Y.Kuk, Journal De Physique IV, pp C5 285-289

"Nano-scale lithography of PMPMA with Atomic Force Microscope", C.H.Choi, J.H.Choi, S.W.Park, J.C.Kim, Y.M.Lee, H.W.Lee, 10th International Vacuum Microelectronics Conference, Aug. 1997. Kyungju Korea.

"Atomic Force Microscope based Lithography of Poly(p-(methyl)phenyl methacrylate) Langmuir-Blodgett Films", 이해원, 김진철, 이유미, 김응렬, 신용우, 박선우, 대한화학회 제79회 연회 및 춘계총회, 1997, 101

"SPM의 반도체 공정에의 응용", 신용우, 최창훈, 박선우, 물리학과 첨단기술, ISSN 1225-2336, April 1998, pp11-13.

"Nanometer-Scale Lithography Ultrathin Films with Atomic Force Microscope", J.C.Kim, H.W.Lee, Y.W.Shin, S.W.Park, Journal of the Korean Physical Society, Vol 33, November 1998, pp S84~S86

"Atomic Force Microscope Based Nanolithography of Self-Assembled Organosilane Monolayer Resists", J.C.Kim, Y.Oh, H.W.Lee, Y.W.Shin, S.W.Park, Japanese Journal of Applied Physics, Vol 37 December 1998, pp 7148~7150

[특허]

Serial #: 9/024,892

Title: "Method And Apparatus for Measureing Mechanical And Electrical Charactrization of A surfaceUsing Electrostatic Force Modulation Microscopy Which Operates in Contact Mode "

Inventors: Jaewan Hong, Sang-il Park, Zheong-Gu Khim

Filing date: Feb 17, 1998

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

본 과제를 통하여 개발된 AFM Lithography resist 물질들과 최적화된 공정들을 적용하여 100nm 정도의 Lithography 기술은 이미 확보하였다. 그러나, 현실적으로 이러한 기술을 실제 공정에 적용하기에는 AFM lithography가 through put rate가 너무 낮아 그 응용범위가 제한될 수밖에 없다.

이러한 문제로 G-bit DRAM 생산에 필수적인 100nm이하의 미세 pattern에는 부적절한 것으로 사료된다. 한편으로, 제작 개발한 FE-tips lithography system의 초기 개발단계에서 보여준 가능성을 볼 때 이는 현실성 있는 차세대 lithography 장치로 발전 가능성이 큰 것으로 사료된다.

한편, 이번 연구결과는 AFM tip을 이용한 nanolithography 장비 개발에 기반 기술을 제공할 뿐 아니라, SET등의 양자소자 개발에도 기여할 것으로 기대된다. 구체적으로는 우선 Molecular Measuring Machine과 같은 3차원 나노 측정 장치의 개발에 활용할 계획이다. 그리고, SPM probe, 레이저 간섭계, 표면거칠기 측정기, 진원도 측정기 등의 교정에도 본 연구결과를 응용할 것이며, 유사 장치의 국제비교를 통하여 특성을 평가하고 보완할 계획이다.

향후 본 연구개발 결과를 바탕으로, 나노미터 정확도의 초정밀 위치결정 범위를 현재의 100 μm 로부터 1000 mm까지 확장시키는 연구가 필요할 것이다.

제 6 장 참고문헌

- Albrecht T.R. and C. F. Quate, J. Appl. Phys. 62(7), 1 October 1987.
- Andres, M., M. Muck, and C. Heiden, J. Vac. Sci. Technol. A **8**, 349 (1990).
- Bae, M. K., T. Horiuchi, K. Hara, Y. Ishibashi, and K. Matsushige, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 **33**, 1390 (1994).
- Barnes J. R., A. C. F. Hoole, M. P. Murrell, M. E. Welland, A. N. Broers, J. P. Bourgoïn, H. Biebuyck, M. B. Jhonson, and B. Michel, Appl. Phys. Lett., **67**, 1538 (1995).
- Barrett R. C. and C. F. Quate, J. Appl. Phys., **70**, 2725 (1991).
- Barrett R. C. and C. F. Quate, Ultramicroscopy, **42-44**, 262 (1992).
- Becker, P., Dorenwendt, K., et al, "Absolute measurement of the (220) lattice plane spacing in a silicon crystal" Phys. Rev. Lett. **46**, 1540 (1981)
- Binning G., C. F. Quate and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. Vol.59, No.9, pp. 930-933, 3 March 1986.
- Bluhm, H. and R. Wiesendanger, J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 1180 (1996).
- Bluhm, H., A. Wadas, R. Wiesendanger, K.-K. Meyer, and L. Szczesniak, Phys. Rev. B **55**, 4 (1997).
- Bluhm, H., U. D. Schwarz, and R. Wiesendanger, Phys. Rev. B **57**, 161 (1998).
- Bochi, H. J. Hug, D. I. Paul, B. Stiefel, A. Moser, I. Parashikov, H. -J. Guntherodt, and R. C. O'Handley, Phys. Rev. Lett. **75**, 1839(1995).
- Bonse, U., Hart, M., "An x-ray interferometer", Appl. Phys. Lett. **6**, 155 (1965)
- Bouchiat and D. Esteve Appl. Phys. Lett., **69**, 3098 (1996)
- Bouchiat et al, Appl. Phys. Lett **69**, 3098 (1996)
- Bowen, D.K., Chetwynd, D.G., Schwarzenberger, D.R. and Smith, S., "Sub-nanometre transducer characterization by x-ray interferometry", Prec. Eng. **12**, 165 (1990)
- Brozek T. and C. R. Viswanathan, Appl. Phys. Lett., **68**, 1826 (1996).
- Chiang C., N. V. Lam, J. K. Chu, N. Cox, D. Fraser, J. Bozarth and B. Mumford, IEEE VMIC Conf., 15-16 June, 1987.
- Choi C. H., S. H. Lee, S. G. Kim, J. H. Choi and S. W. Park, J. Kor. Vac. Soc. **5**, 309 (1996).
- Choi C. H., S. H. Lee, S. G. Kim, J. H. Choi, and S. W. Park, JKVS, Vol. 5, No. 4, pp. 309-314, December 1996.
- Choi J. Y., P.K. Ko, C. Hu, and W. F. Scott, J. Appl. Phys., **65**, 354 (1989).

- Correia, A., J. Massanell, N. Garcia, A. P. Levanyuk, A. Zlatkin, and J. Przeslawski, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 2796 (1996).
- Crandall, B.C., *Nanotechnology*, The MIT Press (1996)
- Curtis C. C. and K. C. Hsieh, "spacecraft mass spectrometer ion source employing field emission cathodes", *Rev. Sci. Instru.*, Vol. 57, pp. 989~990, 1986
- Day and D.R. Allee, *Appl. Phys. Lett.*, 62, 2691 (1993)
- Day H. C., D. R. Alee, R. George, and V. A. Burrows, *Appl. Phys. Lett.* **62**(14). pp.1629-161631, 5 April 1993.
- EC-report, "Combined Optical and X-ray Interferometry for High Precision Dimensional Metrology", EC-Contact No.3422/1/0/182/4/91-BCR-D(30), Final Report (1997)
- Edwards H., R. McGlothlin, R. S. Martin, Elias. U, M. Gribelyuk, R. Mahaffy, C. K. Shih, R. S. List, and V. A. Ukraintsev, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 698 (1998).
- Enachescu M., E. hartmann, and F. Koch, *Appl. Phys. Lett.* **64**(17). pp.2253-2255, April 1994.
- Eng, L. M., M. Friedrich, J. Fousek, and P. Gunter, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 1191 (1996).
- Fischetti M. V., Z. A. Weinberg, and J. A. Calise, *J. Appl. Phys.*, **57**, 418 (1985).
- Franke, K., J. Besold, W. Haessler, and C. Seegebarth, *Surf. Sci. Lett.* **302**, L283 (1994); K. Franke, *Ferroelectr. Lett. Sect.* **19**, 25 (1995); K. Franke, H. Huelz, and S. Seifert, *ibid.* **23**,1 (1997).
- Fujihira Masamichi and hajime Takano, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**(3). pp. 1860-1865, May/Jun 1994.
- Gruverman, A., O. Auciello, and H. Tokumoto, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 602 (1996).
- Gruverman, A., O. Auciello, R. Ramesh, and H. Tokumoto, *Nanotechnology* **8**, A38 (1997).
- Gruverman, A., O. Kolosov, J. Hatano, K. Takahashi, and H. Tokumoto, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13**, 1095 (1995).
- Guntherodt and R. Wiesendanger, ed. *Scanning Tunneling Microscopy I-II* (Springer-Verlag, Berlin, 1992), p.198.
- Hansen P. J., Y. E. Stausser, A. N. Erickson, E. J. Tarsa, P. Kozodoy, E. G. Brazel, and J. P. Ibbetson, U. Mishra, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2247 (1998).
- Hong et al., *Rev. Sci. Instrum.* **68**(12), 4506 (1997)
- Hong J. W., Z. G. Khim, A. S. Hou, and Sang-il Park, *Appl. Phys. Lett.* **69**,

- 2831 (1996).
- Hong, J. W., D. S. Khang, J. C. Shin, H. J. Kim, and Z. G. Khim, *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 2942 (1998).
- Hong, J. W., K. H. Noh, S.-I. Park, S. I. Kwun, and Z. G. Khim, *Phys. Rev. B* **58**, 5078 (1998).
- Hong, J. W., Sang-il Park, and Z. G. Khim, *Rev. Sci. Instr.* **70**, 1735 (1999).
- Hong, J. W., Z. G. Khim, A. S. Hou, and S.-I. Park, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2831 (1996).
- Hopkins R. J., T. T. Baldwin, and S. K. Gupta, *electrochemical Society Meeting*, May 1989.
- Hoshino, S., T. Mitsui, F. Jona, and R. Pepinsky, *Phys. Rev.* **107**, 1255(1957).
- in Science and Technology*, edited by K.-H. Hellwege and A. M. Hellwege, Landolt-Boörnstein, New Series, Group III, Vol. **3** (Springer-Verlag, Berlin, 1969), pp. 49596.
- Itsumi M., *J. Appl. Phys.*, **52**, 3491 (1981).
- Kang C. J., C. K. Kim, J. D. Lera, Y. Kuk, K. M. Mang, J. G. Lee, K. S. Suh, C. C. Williams, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1546 (1997).
- Kim J. C. et al., "대한학회 제79회 연회 및 춘계총회", 101 (1997)
- Kolosoov, O., A. Gruverman, Jun Hatano, K. Takahashi, and H. Tokumoto, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4309 (1995).
- Kopanski J. J., J. F. Marchiando, and J. R. Lowney, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 14**, 242 (1996).
- Lee Robert Edward, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*(Prentice Hall, 1993)
- Lines, M. E. and A. M. Glass, *Principle and Applications of Ferroelectrics and Related Materials* (Clarendon, New York, 1982), p. 629.
- Lüthi, R., H. Haefke, K.-P. Meyer, E. Meyer, L. Howald, and H.-J. Guntherodt, *J. Appl. Phys.* **74**, 7461 (1993).
- Lüthi, R., H. Haefke, W. Gutmannsbauer, E. Meyer, L. Howald, and H.-J. Guntherodt, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 2451 (1994).
- M. Wendel et al, *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1775 (1994)
- Maiviald, P., H. J. Butt, S. A. C. Gould, C. B. Prater, B. Drake, J. A. Gurley, V. B. Elings, and P. K. Hansma, *Nanotechnology* **2**, 103 (1991).
- Majumdar A., P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Garaham and J. Alexander, *Appl. Phys. Lett.* **61**, 2293 (1992)
- Majumdar A., P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham and J. Alexander, *Appl. Phys. Lett.* **61**(19), 9 November 1992.

- Majumdar et al, Appl. Phys. Lett., 61, 2293 (1992)
- Mamin H. J. and D. Rugar, Appl. Phys. Lett. 62, 1003, 1992.
- Marrian C. R. K., E. A. Dobisz and R. J. Colton, J. Vac. Sci. Technol B 9(2), Mar/Apr 1991b.
- Marrian C. R. K., F. K. Perkins, S. L. Brandow, T. S. Koloski, E. A. Dobisz, and J. M. Calvert, Appl. Phys. Lett. 64(3). pp.390-392, 17 January 1994.
- Marrian C. R., E. A. Dobisz and C. K. Marrian, Appl. Phys. Lett. 58, 2526, 1991a.
- Marrian C. R., E. A. Dobisz, and J. A. Dagata, J. Vac. Sci. Technol. B 10, 2877, 1992
- Marshiano J. F., J. Res. Inst. Stand. Technol. 100, 661 (1995).
- Martin, Y., C. C. Williams, and H. K. Wickramasinghe, J. Appl. Phys. 61, 4723 (1987).
- Martin, Y., D. W. Abraham, and H. K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. 52, 1103 (1988).
- Matsumoto et al, J. Vac. Sci. Technol. B, 14(2), 1331 (1996)
- Matsumoto K., Y. Gotoh, J. Shirakash, T. Maeda, J. S. Harris, Inter. Confer. on Solid State Device Material, Hamamatsu, 494 (1997)
- Mattias, B. T., C. E. Miller, and J. R. Remeika, Phys. Rev. 104, 849 (1956).
- McCord M. A., R. F. W. Pease, J. Vac. Sci. Technol. B 4, 86 (1986)
- Meinertzhagen A., C. Petit, G. Yard, and M. Jourdain, and G. Salace, J. Appl. Phys., 79, 2549 (1996).
- Minne et al, Appl. Phys. Lett., 66, 703 (1995)
- Minne et al, Appl. Phys. Lett., 67, 3918 (1995)
- Minne et al, Appl. Phys. Lett., 72, 2340 (1998)
- Minne et al, J. Vac. Sci. Technol., B 14(4), 2456 (1996)
- Minne et al., Appl. Phys. Lett, 72, 2340 (1998)
- Minne S. C., H. T. Soh, Ph. Flueckiger and C. F. Quate, Appl. Phys. Lett. 6, 703 (1995)
- Minne S. C., H. T. Soh, Ph. Flueckiger, and C. F. Quate, Appl. Phys. Lett. 66 (6), pp.703-705, 6 February 1995.
- Minne S. C., Ph. Flueckiger, H. T. Soh, and C. F. Quate, J. Vac. Sci. Technol. B 13, 1380 (1995)
- Mitsui, Toshio, *et al.* in *Numerical Data and Functional Relation-ships*
- Nagahara L. A., H. Ohno, and H. Tokumoto, J. Photopolym. Sci. Technol., Vol. 8, No. 4. pp.669-676, 1995.
- Nakano T., K. Tokunaga, and T. Ohta, Extended Abstracts of PLANAR 94, Planarization Techniques For submicron Technologies, Sunnyvale, CA 6 June

- 1994(Allied Signal, Santa Clara, 1994).
- Nakatani, N., Jpn. J. Appl. Phys. **12**, 1723 (1973).
- Nicollian E. H. and J. R. Brews: *MOS Physics and Technology* (Wiley, New York, 1982), p150.
- Nonnenmacher, M., M. P. Boyle, and H. K. Wickramashinge, Appl. Phys. Lett. **58**, 2921 (1991).
- Ohgami, J., Y. Sugawara, S. Morita, E. Nakamura; and T. Ozaki, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 **35**, 2734 (1996).
- Pai Pai-Lin, William G Oldham, Chiu H. Ting, IEEE VMIC Conf., 15-16 June, 1987.
- Palmer R. C., E. J. Denlinger and H. Kawamoto, RCA Rev., **43**, 194 (1982).
- Park et al, "AFM lithography using SOG as a resist material", Asian STM'96 conf, 1996.
- Park S. W. et al., Appl. Phys. Lett. **67**, 2415 (1995).
- Park S. W., H. T. Soh, C. F. Quate, and S. I. Park, Appl. Phys. Lett. **67**(16). pp.2415- 2417, 16 October 1995.
- Pilloud Denise L., Marcelo B. A. Fontes, Konda S. Reddy, Chistopher C. Moser, Ramy S.Farid, Francesc Rabanal, "The 8th international Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX". Stocholm, Sweden, June 25-29, 1996
- Pingue et al, J.Vac.Sci.Technol. B **15**(4), 1398 (1997)
- Rosolen G. C., A. C. F. Hoole, M. E. Welland, and A. N. Broers, Appl. Phys. Lett. **63**(17). pp.2435-2437, 25 October 1993.
- Samanta P. and C. K. Sarkar, J. Appl. Phys., **83**, 2662 (1998).
- Sarid, Scanning Force Microscopy (Oxford University, New York, 1991), p. 31.
- Saurenbach, F. and B. D. Terris, Appl. Phys. Lett. **56**, 1703 (1990).
- Schwarz Daniel K., Surface Sci. Rep. **27**, 241-334 (1997).
- Scott et al, Science, **246**, 1400 (1989)
- Sematech, "The national technology roadmap for semiconductors" (1997)
- Snow and P.M.Campbell, Appl. Phys. Lett., **64**, 1932 (1994)
- Snow E. S. and P. M. Campbell, Appl. Phys. Lett. **64**(15), pp1932-1924, 11 April 1994.
- Snow E. S., P. M. Campbell, and P. J. McMarr, Appl. Phys. Lett. **63**(6), 9, pp. 749- 751, August 1993.
- Snow et al, Appl. Phys. Lett., **69**(2), 269 (1996)
- Sohn and R.L.Willett, Appl. Phys. Lett., **67**, 1552 (1995)
- Sohn et al, Appl.Phys.Lett **67**, 155 2 (1995)
- Song H. J., M. J. Rack. K. Abugnarbieh, S. Y. Lee, V. Khan, D. K. Ferry, and

- D. R. Allee, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 3720 (1994).
- Stern, J. E., B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2117 (1988).
- Sugimura et al, *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1288 (1993)
- Takao Shiokawa et al., *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2481 (1998)
- Takata, K., *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, 882 (1996).
- Terris, B. D., J. E. Stern, D. Rugar, and H. J. Mamin, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, 374 (1989).
- Terris, B. D., J. E. Stern, D. Rugar, and H. J. Mamin, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 2669 (1989).
- Thibaudau F., J. R. Roche, and F. Salvan, *Appl. Phys. Lett.* **64**(4).pp.523-525, 24 January 1994.
- Thompson I. F., C. G. Willson, M. J. Bowden, Introduction to Microlithography, ACS symposium series, ISSN 0097-6156:219.
- Tomiye H., T. Yao, H. Kawami, and T. Hayashi, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4045 (1996).
- Trombetta L. P., F. J. Feigl, and R. J. Zeto, *J. Appl. Phys.*, **69**, 2512 (1991).
- Valera, A. N. Farley, S. R. Hoon, L. Zhou, S. McVitie, and J. N. Chapman, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2566(1995).
- Wang Daehan, Liming Tsau, and K. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **65**(11). pp.1415-1417, 12 September 1994.
- Weaver, J. M. R., D. W. Abraham, *J. Vac. Sci. Technol. B* **9**, 1559 (1991).
- Williams C. C., J. Slinkman, W. P. Hough, and H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1662 (1989).
- Wines Landon B., Satish K. Gupta, IEEE VMIC Conf., 9-10 June, 1986.
- Wischnitzer Saul, Introduction to Electron Microscopy (Pergamon Press, 1989)
- Wolf S., Silicon Processing for the VLSI Era (Lattice Press, 1990)
- Yamamoto T., Y. Suzuki, H. Sugimura, and N. Nakagiri, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 3793 (1996).
- Yamamoto T., Y. Suzuki, M. Miyashita, H. Sugimura, and N. Nakagiri, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 15**, 1547 (1997).
- Yamamoto T., Y. Suzuki, M. Miyashita, H. Sugimura, and N. Nakagiri, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 1922 (1997).
- Yokoyama, S., "Intermode beat stabilized laser with frequency pulling", *Applied Optics. Vol. 33, No. 3*, 358-363 (1994)