

20 万円で作る原子間力顕微鏡による結晶格子の観察

A student project: making atomic force microscope for 200,000 yen each

六 尾 妙*・中 澤 友 則*・新 野 俊 樹**・山 本 晃 生*
金 範 峻***・星 泰 雄***・池 田 耕 吉***・川 勝 英 樹***

Tae MUTSUO, Tomonori NAKAZAWA, Toshiki NIINO, Akio YAMAMOTO,
Beomjoon KIM, Yasuo HOSHI, Kokichi IKEDA and Hideki KAWAKATSU

1. は じ め に

工学系研究科精密機械専攻 A コース (ナノ・マイクロエンジニアリングコース) では, 新しい試みとして, 2003 年の前期に大学院学生たちが科学装置のシステム作製を行うものを開講した. 授業は週 2 コマで, 4 人の教官が講義と作製, 実験を担当した. 他専攻からも受講可能とした. 今年度は, 走査型力顕微鏡 (以下, AFM) を取り上げた. 新野が電気回路, 山本がソフトエウアとマイコンボード, 金が試料作製, そして川勝が AFM ヘッドを担当した. 以下に講義のあらましを紹介する. 本文は受講者の六尾と中澤が担当した.

2. 目 的

AFM (Atomic Force Microscopy) は, 探針先端と試料表面との間に働く原子間力をカンチレバーの変位から測定し, 探針を表面に沿って捜査することで表面の像を得る顕微鏡である. 図 1 に原理概略を示す. AFM は STM (Scanning Tunneling Microscope) では観察できない絶縁体表面の構造も観察できるため, 多くの人々に研究され, 発展してきた.

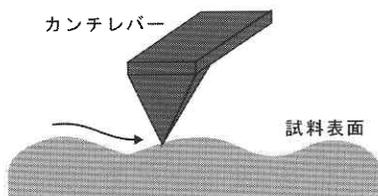


図 1 AFM 原理概略図

本講義では AFM の製作を通して AFM の原理について学ぶほか, アナログ電気回路, C 言語によるプログラミング, マイコン制御などの基礎の習得を目的とした.

3. 装 置 概 略

AFM には, 主に以下の動作方式がある.

- (1) 探針を試料表面に接触させカンチレバーの変位から表面形状を測定するコンタクトモード¹⁾
- (2) 探針を試料表面に周期的に接触させ, カンチレバーの振動振幅変化から表面形状を測定するタッピングモード²⁾
- (3) 探針を試料表面に接触させず, カンチレバーの振動周波数変化から表面形状を測定するノンコンタクトモード³⁾

本授業では AFM の動作方式として最も基礎的なモデルであり, 製作が容易であるコンタクトモードを採用した.

カンチレバーの変位検出は光てこ式⁴⁾によって行った. 光てこ式の構成を図 2 に示す. 図中の寸法は, 今回作製した AFM ヘッドのものである. 光てこ式は, カンチレバー背面にレーザを照射してその反射光を感光素子で受光することで, カンチレバーの挙動を検出する方式である. 試料面の凹凸によってカンチレバーが変位すると感光素子へ入

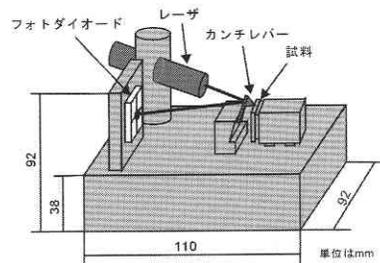


図 2 作製した TAFM (Tenori Atomic Force Microscope) ヘッド

*東京大学大学院 工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

***東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

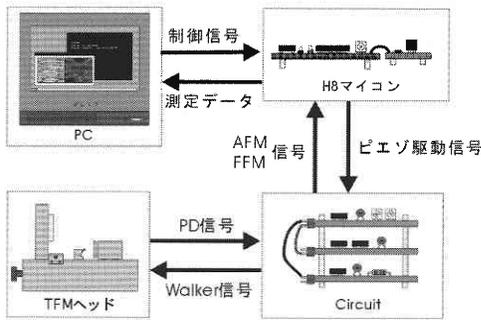


図3 講義で作製したAFM構成図

射する反射光もそれに伴い変位し、感光素子の出力が変化する。この出力の変化をモニターすることでカンチレバー変位の検出を行うものである。

このように、光てこ式は原理や構造が比較的単純であり、少ない費用での製作が可能である。本講義では感光素子として4分割フォトダイオードを用いた。

本授業で作製したAFMの構成を図3に示す。AFMヘッドからの信号をアナログ回路で処理し、H8マイコンを経由してPCにデータを送っている。AFMヘッドの粗動及び微動にはそれぞれ圧電素子を使用し、H8マイコンから電気回路を経由しての制御を行っている。

本授業で学生が製作した部分は、

- (1) データ取得、および走査制御プログラム：あらかじめ用意されたサンプルプログラムを元に、測定データを取得するためのプログラムを作成した。PC用のソフトはH8マイコンから送られてくるデータを保存するためのプログラムである。またH8マイコン用のソフトは、信号処理回路とPCとの間のインターフェースプログラムと、AFMヘッドの圧電素子の駆動を制御するプログラムである。
- (2) 信号処理回路：フォトダイオードからの信号をAFM, FFM信号へ演算し、PCへの入力に適した電圧に変換する回路を作製した。構成はI-V変換、加減演算、積分、アンプなどである。
- (3) AFMヘッド：実際に走査を行い、試料観察を行う本体部分である。
- (4) 観察試料：金を蒸着したシリコンウェハをエッチングすることにより、マイクロパターンを作製した。マスクはPDMSスタンプを用いてウェハ上にSAM (self assembled monolayer) を付着させることで行った。

4. 授業内容、及び製作コスト

授業は週に90分×2コマ、全14回で構成した。授業内

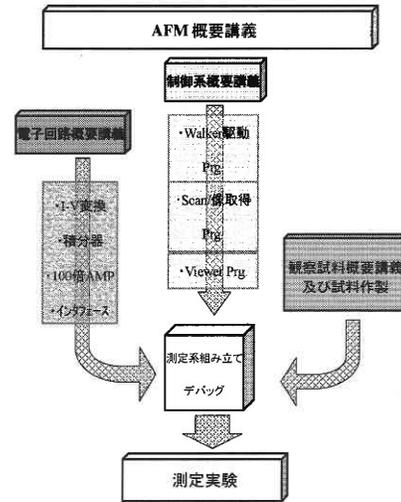


図4 授業内容、製作の流れ

表1 製作コスト概要

品目	コスト(¥)
PC	50,000
H8マイコンキット	5,000
信号処理回路	28,450
Walker 駆動回路	17,443
AFMヘッド	97,152
観察試料	1,840
合計	199,885



図5 授業風景1

容、作製の流れは図4のようである。3～4人からなる班を5班構成し、各班それぞれで1台AFMを作製するという形をとった。作製は講義を行った後に授業時間中／外に各班で行った。図5は授業風景である。

AFM 1台あたりの製作コストは、PC、機械部品、電気回路部品等すべてを含んでおよそ20万円とした。表1にその大まかな内訳を示す。



回路制作中

図5 授業風景2

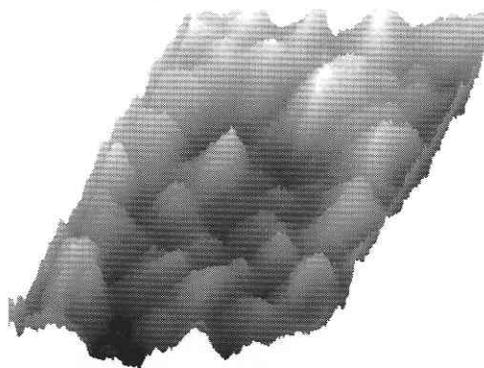


図6 金蒸着面観察結果

5. 測定実験結果

試料として①金蒸着を行ったシリコンウェハ, ②マイカへき開面, ③SAM面を用いて測定実験を行った. 図6に金蒸着面の観察結果, 図7にマイカの観察結果を示す.

金蒸着面の観察は, 走査範囲約 $300\text{ nm} \times 300\text{ nm}$ で行った. ここでは, 金のコルゲーションを確認できた.

マイカの観察は, ATRを用いて走査範囲を約 $30\text{ nm} \times 30\text{ nm}$ に狭めて行った. この走査範囲の縮小は, H8マイコンのD/A出力が8 bitであることを考慮し, ダイナミックレンジを有効に活かすために行った. D/A出力は試料台駆動用の電圧出力であり, これが8 bitのため走査は256段階で行うことになる. したがって本授業で作製したAFMで微細なパターンを表現するには, 走査範囲を必要にして十分な大きさにしておく必要がある.

図7では横1列におよそ濃淡パターンが63回見て取れる. 雲母の結晶間隔はおよそ 0.5 nm であり, 走査を 30 nm の範囲で行った場合には濃淡パターンが約60回観察されることとなる. したがって, 得られた像は雲母結晶を捉えたものであると考えられる.

SAM試料の観察は, ピエゾ電圧, ダイナミックレンジ等の問題で困難であった. 凹凸の大きい面, また広範囲にわたる走査は今後の課題としたい.

6. おわりに

本授業は装置作製や実験の基礎を学ぶことを目的とし, AFM作製を通じてその習得を狙ったものである. 作製したAFMは小型, ローコストであり, 5班すべてでシリコンウェハ上の金蒸着の像取得に成功した. うち2班ではノイズの少ない雲母の原子周期像の取得に成功した. この授業は週2コマの時間数であるが, 土日返上で回路や像取得に明け暮れた班もあった. また, 像の取得できなかった班では, 夏季休業中も努力を続け, 9月に入ってから像の取

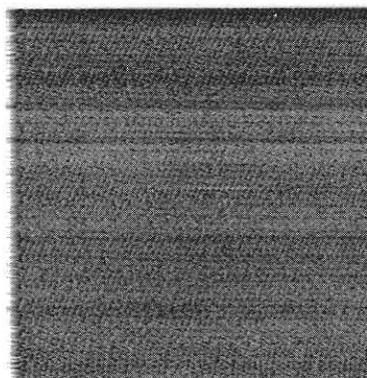


図7 マイカ観察結果

得に成功した. その意味で, 効率よく学生の努力や創意が引き出された授業であったといえる. 走査型力顕微鏡は1986年度ノーベル物理学賞を受賞した走査型トンネル顕微鏡から派生した顕微鏡である. 偉大な先行研究やチームワークに触れ, 時にはリーダーシップを“体感”できたことは大学院学生にとって大きな収穫であったと思う.

謝 辞

本授業は東大精研会の援助により可能となりました. 並びに東京大学生産技術研究所試作工場の方々に部品作製・助言していただきました. ここに記し, 御礼申し上げます.

(2003年9月12日受理)

参 考 文 献

- 1) Binning G., C.F. Quate and Ch. Gerber 1986 Atomic Force Microscopy. Phys. Rev. Lett. 56: 930
- 2) Zhong Q, Innis D, Kjoller K, Elings V.B., 1993, Surf. Sci., 290, L 688
- 3) Martin Y, Williams C.C., Wickramasinghe H.K., 1987, J. Appl. phys., 61: 4723
- 4) Gerhard M., Nabil M.A., 1988, Appl. Phys. Lett. 53: 1045