

# 学 位 論 文 の 要 旨

原子間力顕微鏡による高アスペクト構造計測に向けた探針形状推定手法および観察像補正に関する研究

(Estimation of 3-dimensional structure of atomic force microscope (AFM) probe and correction of the AFM image for precise measurement of nano-structure with high aspect ratio using AFM)

氏 名 原田 恭彦 印

本論文は半導体デバイスを主とした微細構造評価のために、走査型プローブ顕微鏡の一つである原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope) を用いてナノメートル領域の高アスペクト構造を高精度に観察を行うための手法について述べたものである。特に走査型プローブ顕微鏡の特徴であるプローブ (探針) を用いた 3 次元観察と観察精度に影響する要因に着目し、高精度な測定方法の確立を主眼として研究を行った。

AFM を用いた構造評価は探針と試料間の原子間力を検出し高さ方向に対する位置制御を行う計測法のために高い垂直方向の分解能が得られる。一方で、探針と試料構造との接触による位置エラーや摩耗により観察精度の低下が起こる。また、試料構造の大きさが探針先端構造の大きさに対して小さい場合、観察像に現れる探針先端形状の影響による歪みが無視できなくなる。これらの問題は微細化が進むにつれてより顕著になるため、それらの問題に対応するための AFM 観察手法が必要になっている。本研究では AFM の観察精度に影響する要因に着目し、探針先端の影響が大きい微細領域における観察精度向上に向けた補正技術とそれに使用する探針形状の推定技術としてインパルス応答法を応用した探針情報推定手法を開発し、それらの有効性の検討を行った。研究結果として探針形状の推定では推定に適した標準試料形状が円柱形状であること、その観察像から 3 次元探針情報が推定可能であることを示した。AFM 観察像の補正では推定された探針情報を使用した補正により観察精度が向上することを示した。これらの結果から本研究で提案した手法で AFM による 3 次元計測精度の向上に極めて有効であることを実証した。

以下に、本論文の各章の内容について簡単に述べる。

第 1 章では序論として現在の微細構造観察技術の動向について半導体デバイスのロードマップで示される観察対象の構造サイズを始めとして観察を行う顕微鏡の種類、動作モードについて概説し、探針先端形状の影響が懸念となっている現状と観察像補正の従来技術をふまえて課題を示す。

第 2 章では AFM の原理として装置構成と原子間力を検出する仕組みを示し、続いて AFM で高精度観察を行う際に精度に影響する要因を述べ、それらの影響を取り除く方法について従来手法を紹介するとともに改善する方針を示した。AFM での装置構成、観察手法ではカンチレバーに影響する原子間力をたわみから検出するセンサ、アクチュエータについて述べ、試料全体の観察像を得るためのコンタクトモード、ノンコンタクトモードに代表される探針走査方法について説明した。AFM 観察の精度に影響する要因では計測装置のフィードバック制御による影響、探針先端サイズによる影響、探針と試料の相互作用による影響、測定画素数の影響があることを示した。その中でも探針形状の影響を取り除くための探針形状推定方法について従来技術の問題点を挙げ、探針先端構造を推定するために適した構造である円柱型標準試料の観察像に対してインパルス応答の手法を応用することで試料情報を取り除き探針形状を推定する手法を提案した。また、推定された探針情報を使用した観察像の補正技術としてモルフォロジを使用した補正方法について詳細を示した。

第 3 章では本提案である探針推定、補正方法が有効であることを検証するために使用した AFM 装置構成、パラメータ設定および円柱形状の標準試料について詳細を示した。本研究では、標準試料としてドライエッチングにより Si 円柱列を形成し、これを用いてコンタクトモード AFM 像を観察した。Si 円柱の高さは 500 nm、直径は 640 nm である。先端径約 20 nm の探針を使用し、設定力は 40 nN で観察を行った。この観察から実際の試料観察時に探針形状の影響による精度の低下が起きていることを確認した。さらに、実際の測定から得られた観察像から探針形状を推定した。その後、推定された探針形状情報を使用して観察像の補正を行った。

第 4 章では今回提案した探針形状推定手法に対して使用する適切な標準試料形状が円柱形状であることを観察像生成シミュレーションにより確認した。続いて実際に取得された観察像に対して探針形状の推定、補正処理を適用する過程を詳細に示し、探針が推定可能であることを示した。推定された探針のプロファイル検証では SEM（走査電子顕微鏡）での観察像と推定された探針の比較を行い、SEM から読み取られる先端半径に対して、推定された先端半径が近い値になっていることを示し、本探針形状推定方法の有効性を実証した。続いて観察像の補正では推定された探針を使用して元の観察像に対して補正処理を適用し、その結果のプロファイルより頂点部分の幅が 20~30 nm 程度減少し観察精度が向上していることを示し、AFM 像では探針の影響があるため、補正が重要であることを示した。

第 5 章では本論文全体の研究成果を統括し、本研究で得られた成果である高精度な補正を実施するための探針情報の推定技術と観察像の補正処理が実際の検証結果から有効であることを確認した。

Estimation of 3-dimensional structure of atomic force microscope (AFM) probe and correction of the AFM image for precise measurement of nano-structure with high aspect ratio using AFM

Yasuhiko Harada

## Abstract

In this paper, I described new concept and method for accurate measurement of high aspect ratio structure in the nano-scale device by using atomic force microscope (AFM). The AFM is one of the scanning probe microscopes (SPMs), which was used for measuring of dimensions of the micro-fabricated devices. Especially, I also studied the tip-induced distortions of measuring AFM image of the sample and reconstruction methods for an accurate AFM image.

The AFM image has high accuracy because the AFM can measure the surface structure by using very weak atomic force between the probe and sample, and control 3-dimensional positions of the probe as constant force. In the case of conventional AFM observation with the finite size of tip, the AFM image is reliable with no tip effect when the corner size of the sample surface structure is larger than the tip apex. However, when the sample surface has smaller structure than apex of the tip, the image of the sample surface does not reflect to sample surface because contact point between the tip and sample surface is not constant. Consequently, the AFM image contains the structure of the tip shape. The tip-induced distortions become serious problem for accurate measurement. A reconstruction of the AFM image by eliminating tip shape is required in order to obtain the accurate AFM image. In this study, I studied method of reconstruction technique of the AFM image by using estimated 3-dimensional (3-D) tip shape by applying the impulse response technique. To reconstruct the image of the sample surface, I used a morphological reconstruction process. As results of tip estimation, I demonstrated that the proposed method by using the impulse response technique with a cylindrical column standard sample and data processing for sharp column is effective for estimating of 3-D tip shape, which was used in the reconstruction of accurate AFM images. In the experiment of the surface reconstruction by using estimated tip shape, it demonstrated that the reconstructed method provided near original sample surface image compared with as-measured AFM image. Therefore, I clarified that it is very effective for accurate 3-D measurement using AFM to use the surface reconstruction and the tip shape estimation. The details of this paper are described as follows.

In chapter 1, I described the trends of miniaturization of semiconductor devices with roadmap published by ITRS. Then, I describe the overview of the AFM observation for semiconductor devices, and pointed out tip-induced distortion of AFM image.

In chapter 2, the principle of the AFM measurement and factors of the distortion in the AFM

image were explained including the device configurations, atomic force detection, etc. The configuration of the AFM showed the optical sensor to detect the deflection of cantilever and actuator for scanning of the probe or sample. The AFMs such as contact mode, tapping mode, step-in mode, and non-contact mode were described as the AFM measurement. Especially, the AFM image contains some distortion or structure error caused by the feedback delay and error, the tip-induced distortion, and tip and sampling structures. As previous tip estimations, I explained them reported for the accurate AFM images. According to technical issues of them, I propose the method of (1) reconstruction technique of the AFM image by new method (2) using the tip shape estimated from the impulse response technique to solve the issues of previous techniques. Regarding the reconstruction of the AFM image, I used the morphological reconstruction process to make as-measured AFM image correct to obtain the original surface.

In chapter 3, I showed the experimental procedure for check of the availability of the proposed tip estimation and surface reconstruction method. The standard sample which made by dry etching had fine silicon column arrays with a height and diameter of 500 and 640 nm, respectively. The diameter of the apex of the tip was below 20 nm. I used contact mode AFM and high resolution scanning electron microscope (SEM) to check the problems of commercial AFM image and original SEM image. Comparing the observed images, I pointed out the tip-induced distortions in AFM image. Then, I concretely explained the method for estimation of tip shape from as-measured AFM image by using the impulse response technique and I reconstructed correct AFM image by removing a part of distortion influenced by the tip shape from the AFM image.

In chapter 4, I demonstrated that the standard sample of Si column arrays was appropriate for the tip estimation by using impulse response technique and data processing. I estimated tip shape from as-measured AFM image including distortion due to the tip shape, and reconstructed correct AFM image by removing a part of the distortion. In the estimation, I described how to obtain the 3-D AFM pyramidal tip shape using a commercial pyramidal tip and column array standard sample. The estimated tip radius was 14 - 15 nm in various profiles of the tip. The results indicated that the proposed tip estimation method was effective to estimate a 3-D AFM tip structure in order to obtain an accurate AFM image. After the tip estimation, I reconstructed the AFM image using the estimated tip shape. Comparing the cross-section of the tip shape with SEM image, the width of the upper surface of the reconstructed image of the standard column was corrected to be slightly smaller than that in original AFM image (about 30 nm). Comparing this profile with the original SEM image, it was nearly the same as the original sample diameter. I clarified that it was very effective for accurate 3-D measurement using AFM to use proposed method.

In chapter 5, I summarized the studies of the tip shape estimation and surface reconstruction by using impulse response technique. I concluded the proposed method was very effective for accurate observation of nano-scale structure using AFM.