

審査の結果の要旨

氏 名 小野 志亜之

本論文は、「ケルビンプローブフォース顕微鏡での局所電位計測における性能向上に関する研究」と題し、ナノスケールの計測手法としてのケルビンプローブフォース顕微鏡（KFM）の測定技術の向上を図ったものであり、全9章から成っている。

第1章は「緒論」であり、本研究の背景を解説している。原子間力顕微鏡（AFM）の応用形であるKFMは、試料・探針間に働く静電引力を利用して試料表面の形状と接触電位差（以下、ポテンシャル、と呼ぶ）の分布を同時に測定するツールである。KFM測定ではポテンシャルの測定値とその濃淡分布の二種類の情報が得られるが、試料・探針の表面付着物の影響やポテンシャル測定値そのものの意味する試料表面の物性を議論した例はこれまでほとんど見られていない。本章では、その点に言及するとともに、本論文の目的と構成を述べている。

第2章は「動作原理」と題し、コンタクトモード、タッピングモードおよびノンコンタクトモードなど、基本的なAFMの動作モードの概略と、KFMでのポテンシャルフィードバックの原理について述べている。

第3章は「試料およびカンチレバー」と題し、本研究で試料として用いたInAs薄膜、InAs細線およびInAs量子ドットの作製方法およびその構造を説明している。また、本研究で用いるカンチレバーの仕様の概略を述べている。

第4章は「水分系表面付着物がポテンシャル測定値に与える影響」と題し、KFMでの測定値の信頼性を高めるとともにポテンシャル測定値そのものを用いた定量的な議論を可能にするために、探針・試料表面に存在する水分系表面付着物がポテンシャル測定に与える影響についての実験的な検討を行っている。その結果、探針・試料表面から水分系表面付着物を除去することの重要性を指摘するとともに、実際に加熱処理にて水分系表面付着物を除去したInAs薄膜構造に対するポテンシャル計測によって、薄膜表面のフェルミレベルの位置やその膜厚依存性を調べて、他の実験や理論モデルと一致する傾向が得られることを明らかにしている。また、同様の加熱処理を行ったInAs細線構造に対するKFMポテンシャル測定を通じて、KFM測定による材料分布推定の妥当性を示している。

第5章は「静電引力の試料・探針間距離依存性」と題し、シミュレーションと実際のポテンシャル計測を通じてKFM測定における静電引力の探針・試料間距離依存性についての議論を深めている。通常のKFMでは試料表面の形状情報を得るためにカンチレバーを機械的に振動させているため、長距離力の一種である静電引力がこの探針・試料間距離の周期的な変化に影響されることを指摘している。その上で、探針・試料間のポテンシャルおよび電界強度分布、ならびに両者間に働く静電引力の探針・試料間距離依存性をシミュレーションで求めるとともに、実際のKFM測定系で、探針・試料間距離の周期的な変化に伴い静電引力が変動することを実験的に確かめ、両者の比較を行っている。

第6章は「ノンコンタクトモードAFMをベースとしたKFMの構成」と題し、第5章の議論をもとに、探針・試料間の平均距離を抑えてポテンシャル像の分解能の向上を図る目的でノンコンタクトモードAFMをベースとしたKFM (NC-KFM) を新たに構成し、InAs細線やInAs量子ドットに対してポテンシャル像の高分解能測定を行った結果を述べている。細線や量子ドット領域のポテンシャルがその周囲と比べて負に大きなポテンシャルが得られるとともに、ドット試料でのコントラストはドットの直径の増大にともなって増大することを実験的に確かめている。その解釈として、ポテンシャルが真のドットサイズ依存性を持っている可能性と、NC-KFMを用いてはいるものの探針側面の影響を完全に排除できずにある空間的広がり平均化したポテンシャル値が観測されている可能性の両者を考えるべきであることを指摘している。

第7章は「KFM測定におけるポテンシャル分布の平均化の影響」と題し、第6章で指摘したような探針側面の影響によるポテンシャル値の平均化の程度を調べるために、探針の形状を考慮に入れた2次元ポテンシャル分布と、それをもとに試料・探針間に働く静電引力を計算するプログラムを自作し、静電引力が最小になるような探針の電位、すなわち実際のKFM測定で得られるポテンシャル値、を計算した結果を述べている。計算結果から、探針・試料間の距離が十分小さいとき、測定対象の大きさ（例えば、量子ドットの直径）が探針先端の曲率半径より大きければ真のポテンシャル値とKFMでのポテンシャル測定値はほぼ等しくなり、探針側面の影響をほぼ無視できることを明らかにしている。また、実際のKFM測定で得られたポテンシャル値を校正することにより、試料表面の真のポテンシャル分布を求めることができる可能性をも示している。

第8章は「サンプル・ホールド回路を用いたKFMの構成」と題し、静電引力の探針・試料間距離変化による影響を抑えながらポテンシャル測定を行う方法として、タッピングモードAFMをベースとしたKFMのポテンシャルフィードバック回路にサンプル・ホールド回路を挿入するKFM測定系を提案し、実際に測定系を構築してその効果の実証を行った結果について述べている。InAs量子ドットに対するポテンシャル計測では、従来手法では観測できなかったドット内部やその周辺に存在する同心円状のポテンシャル分布が明瞭に観測されている。この結果からポテンシャル測定における空間分解能は10nm以下と見積もることができ、世界トップレベルの空間分解能が実現されたことを示している。さらに、本測定系では試料・探針間に印加する交流バイアスの振幅も低く抑えられることから、試料表面の電子分布やポテンシャル分布に与える影響も最小限に抑えられることも明らかにしている。

第9章は「結論」であり、本論文全体の研究成果をまとめて要約するとともにその意義を述べている。

以上これを要するに、本論文は、KFMによるポテンシャル計測における性能向上を図ることを目的として、測定値の信頼性、定量性を向上させるためには試料の清浄化が効果的であることや、探針先端形状および探針・試料間の距離変動がポテンシャル測定値に与える影響を明らかにした上で、サンプル・ホールド回路を用いた独自のKFMフィードバックシステムを提案・構築し、ポテンシャル測定において従来手法では実現不能であった10nm程度以下の空間分解能を達成するなど、計測手法としてのKFMの高性能化を実現したものであり、電子工学上、寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。

