Osaka University Knowledge Archive

Title	非接触原子間力顕微鏡の画像化機構と静電気力測定の超高分解能化への応用に関する研究
Author(s)	内橋, 貴之
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3143945
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

【26】

氏　　名	内橋貴之（うちはしたかゆき）
博士の専攻分野の名称	博　士（工　学）
学位記番号	第　13831　号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科電子工学専攻
学位論文名	**非接触原子間力顕微鏡の画像化機構と静電気力測定の超高分解能化への応用に関する研究**
論文審査委員	（主査） 教　授　森田　清三 （副査） 教　授　吉野　勝美　　教　授　濱口　智尋　　教　授　尾浦憲治郎 教　授　西原　　浩

論文内容の要旨

本論文は，非接触原子間力顕微鏡の画像化機構を実験的に検討し，さらに静電気力測定の超高分解化への応用に関する研究成果をまとめたもので6章から構成されている。

第1章では，走査型トンネル顕微鏡（STM）と接触型原子間力顕微鏡（AFM）の問題点を指摘して，非接触AFMの必要性について述べ，本研究の目的と意義について明らかにしている。

第2章では，周波数変調（FM）検出方式非接触AFMの測定原理について詳細に述べている。また，AFMテコ先端の探針と試料との実験的な接触点の定義について述べ，加振振幅一定モードでの力勾配曲線の特徴について述べている。最後に，AFMテコの振動に対する周波数シフトの検出感度とノイズの振幅依存性から，最も良い信号・雑音比（S／N）が得られる最適な振動振幅の大きさを明らかにしている。

第3章では，本研究で見出したSi（111）7×7再構成表面での2種類の力勾配曲線と原子分解能像との相関を示し，原子分解能像を安定に測定するための観察条件を明らかにしている。また，サイトに依存したコントラストを持つ画像を示し，そのコントラストの原因についても検討している。これらの結果は探針と試料との物理結合と化学結合によるポテンシャルエネルギー曲線を考慮に入れたモデルで説明できることを提案し，非接触AFMの画像化機構を明らかにしている。

第4章では，Si（111）7×7再構成表面で，原子スケールのフォーススペクトロスコピーの測定を行った結果を示し，第3章で提案した画像化機構のモデルの検証を行っている。

第5章では，FM検出方式非接触AFMの応用として静電気力測定の超高分解能化を行った結果について述べている。静電気力差し引き方式でファンデルワールス力と静電気力が分離できることを実証し，シリコン熱酸化膜で正に帯電したトラップサイトの高分解能観察に成功している。これから，静電気力測定の3次元性能が従来に比べて約2000倍向上したことを示している。次に，周波数分割・時分割併用方式による静電気力測定で原子分解能観察を行うための観察条件を明らかにしている。この方式を用いて，n－GaAs（110）劈開面で正に帯電した欠陥の原子分解能観察に成功し，この方式では静電気力測定の3次元性能が従来に比べて約20000倍向上したことを示している。

第6章は結論であり，本論文で得られた成果を総括し，本研究の結論を述べている。

論文審査の結果の要旨

接触状態の原子間力顕微鏡（AFM）測定では，格子像は見えるが原子レベルの点欠陥が見えないことや，一個の原子では支えきれない大荷重下でも格子像が見えることより，真の原子分解能が得られないと推定されている。最近，周波数変調（FM）検出方法を用いた非接触状態の原子間力顕微鏡測定で，Si（111）7×7再構成やInP（110）劈開面の格子像や原子レベルの点欠陥が観測可能となり，真の原子分解能観察がAFMでも初めて実現している。しかしながら，この非接触AFMは，実験が始まったばかりで，装置は未完成で，理論もなく，画像化機構すら不明の状況で，その完成が重要な課題である。本論文では，黎明期に有る非接触AFMを取り上げ，AFMテコ先端の探針と試料との相互作用を調べ，原子分解能を安定に得るための観察条件と画像化機構を解明するとともに，静電気力測定の超高分解能化を実現している。得られた主要な成果を要約すると次の通りである。

(1)AFMテコを振動させる2つの動作モード（加振振幅一定モードと振動振幅一定モード）があることを明らかにしている。

(2)探針と試料の破壊を極力抑え，再現性良く力勾配曲線を測定するには，加振振幅一定モードが良いことを明らかにしている。

(3)AFMテコの振動に対する周波数シフトの検出感度とノイズの振幅依存性から，最も良い信号・雑音化（S／N）が得られる最適な振動振幅の大きさを明らかにしている。

(4)Si（111）7×7再構成表面上では，周波数シフトが探針－試料間距離の減少に対して連続的に変化する場合と不連続に変化する場合の2種類の力勾配曲線が得られることを初めて明らかにしている。

(5)Si（111）7×7再構成表面の非接触AFM測定で，S／Nの高い原子分解能像を安定に得るには，力勾配曲線が不連続に変化する条件下で，かつ，不連続な変化が起こる探針－試料間距離で画像化を行う必要があることを明らかにしている。

(6)非接触AFMでSi（111）7×7再構成表面にある4種類のSi吸着原子（アダトム）のサイトに依存したコントラストを持つ画像が得られることを示し，そのコントラストは，アダトムの電荷量または化学的な活性度の違いを反映している可能性があることを示している。

(7)S／Nの高い画像は探針先端のSi原子と試料表面のSiアダトムのダングリングボンド間の共有結合による力で画像化されている可能性があることを明らかにしている。

(8)原子スケールでのフォーススペクトロスコピーの測定によってダングリングボンドを有するアダトム上では力勾配曲線に不連続な変化が見られ，ダングリングボンドのないアダトム間の隙間の上では力勾配曲線が連続的に変化することを明らかにしている。この結果は力勾配曲線の不連続な変化が探針と試料間の共有結合によって生じているとするモデルから予想される結果に一致する。

(9)原子スケールでのフォーススペクトロスコピーの測定によって，Si（111）7×7再構成表面の原子分解能像で観察されるアダトムの高さとコーナーホールの深さが同程度になっている特異な波形が説明できることを示し，非接触AFMで画像化されるアダトムの大きさは，探針と試料との間に共有結合が形成される領域を示していることを明らかにしている。

(10)静電気力測定の超高分解能化を目的として2つの方式（静電気力差し引き方式と周波数分割・時分割併用方式）を開発し，静電気力測定の超高分解能化を実現している。

(11)静電気力差し引き方式によって，シリコン熱酸化膜で凹凸と静電気力の同時測定を行い，シリコン酸化膜中にトラップされた正電荷と思われる静電気力分布を観察している。この方法で，静電気力測定の3次元性能を従来に比べて約2000倍向上することに成功している。

(12)周波数分割・時分割併用方式によって，n－GaAs（110）劈開面の正に帯電した欠陥を原子分解能で観察することに成功している。また，n－GaAs（110）劈開面で力勾配曲線の減衰距離を測定した結果，凹凸と静電気力を原子分解能で測定するための観察条件は，探針－試料間距離 z が $2<z<5$ Åであることを明らかにして

いる。この方法で，静電気力測定の３次元性能を従来に比べて約2000倍向上することに成功している。

以上のように，本論文では，AFM テコ先端の探針と試料との相互作用を調べ，原子分解能を安定に得るための観察条件と画像化機構を解明するとともに，静電気力の超高分解能化を実現している。本研究により，真の原子分解能を持つ非接触AFM は，黎明期を脱し成長期に入って広く普及する事が可能となるので，電子工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。