

Title	極低温原子間力顕微鏡を用いたフォース・スペクトロスコープと単原子操作の研究
Author(s)	大藪, 範昭
Citation	大阪大学, 2006, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/46917
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

氏名	おお 大 数 範 昭
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学位記番号	第 20356 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 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	極低温原子間力顕微鏡を用いたフォース・スペクトロスコピーと単原子操作の研究
論文審査委員	(主査) 教授 森田 清三 (副査) 教授 伊藤 利道 教授 佐々木孝友 教授 片山 光浩 教授 杉野 隆 教授 尾崎 雅則 教授 栖原 敏明 教授 近藤 正彦 教授 谷口 研二 教授 八木 哲也 助教 阿部 真之

論 文 内 容 の 要 旨

第 1 章では研究背景として、非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM) が、導体のみならず絶縁体表面の原子分解能観察が可能な顕微鏡として発展してきていることについて述べた。ここで、NC-AFM で得られる表面凹凸像の画像化機構および、カンチレバーのエネルギー散逸像が探針先端の構造に強く依存することから、探針-試料間に働く相互作用力の測定実験 (フォース・スペクトロスコピー) と、探針モデルを用いた相互作用力の理論計算から探針先端の構造決定が必要であることを指摘した。また、NC-AFM による探針-試料間の相互作用力を制御して行う力学的原子操作技術は、走査トンネル顕微鏡 (STM) では困難であった絶縁体表面上での原子操作にも応用が可能であることを述べた。以上のことを踏まえ、本研究の目的として以下の 2 点を挙げた。

(1) フォース・スペクトロスコピーと、さまざまな探針モデルを用いた場合の相互作用力の理論計算値とを比較することで、探針の構造を決定すること。

(2) NC-AFM による力学的原子操作技術開発の第一歩として、Si(111)-(7x7) および Ge(111)-c(2x8) 表面上において原子操作を行い、NC-AFM を用いた力学的原子操作が可能であることを実証すること。また、原子操作時における、探針-試料間の相互作用力を検討し、その機構の解明を目指すこと。

第 2 章では、NC-AFM の測定原理とその測定方法について述べた。まず、探針と試料表面間に働く力学的相互作用について Lennard-Jones ポテンシャルを例に取り上げ定性的な説明をした。次に回路構成と測定モードについて述べた。また、周波数変調 (FM) 検出方式を用いた NC-AFM の測定原理について、相互作用力と周波数シフトの関係を述べた。ここで、周波数シフトの理論的検出限界について述べ、このことから低温環境が高分解能測定に有利であることを示した。さらに、非破壊のカンチレバーの振動振幅の校正方法について述べた。最後に探針-試料間の接触点の定義について述べた。

第 3 章では、実験で使用した超高真空・極低温環境で試料表面が観測可能な非接触原子間力顕微鏡について述べた。まず、装置構成、真空排気系、装置の除振システムについて述べた。また、カンチレバーの変位検出として光干渉方式を用いている原子間力顕微鏡本体について述べた。さらに、サンプル温度が 10 K 未満の極低温環境を実現する冷

却システムについて述べ 10 K の実験に対する性能評価と、80 K の実験における液体窒素のバブリング対策について述べた。

第 4 章では、目的(1)の研究結果として、まずフォース・スペクトロスコピー実験の手順を示し、Si(111)-(7x7) 表面上での短距離相互作用力を求めた実験結果を示した。次に、Ge(111)-c(2x8) 表面上において、得られる凹凸像が違うとき（探針先端の状態が異なるとき）、フォース・スペクトロスコピーを行い短距離相互作用力を求めた。実験で得られた短距離相互作用力と、探針先端モデルによる理論計算値との比較を行い、探針先端構造を決定した。

第 5 章では、目的(2)の研究結果として NC-AFM による力学的原子操作実験結果を示した。Si(111)-(7x7) および Ge(111)-c(2x8) 表面を用い、力学的垂直原子操作（単原子引き抜きおよび付与）や、探針-試料間を近づけ相互作用力を増加させた状態で、1次元走査（ラビング）や2次元走査（スクラッチ）を行うことによる原子操作の実験結果を示した。また、Ge(111)-c(2x8) 表面に吸着した原子の探針-試料間相互作用力の制御による力学的水平方向操作結果を示した。

第 6 章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題や展望を述べた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、極低温で動作する非接触原子間力顕微鏡（NC-AFM）を用いて、個々の原子のフォース・スペクトロスコピーの測定や、力学的な垂直及び水平原子操作技術の開発を行ったものであり、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章では、関連研究分野の状況についてまとめ、本研究の目的とその位置付けを示している。

第 2 章では、NC-AFM の測定原理とその測定方法について述べている。特に、周波数シフトの理論的検出限界について述べ、このことから低温環境が高分解能測定に有利であることを示している。

第 3 章では、実験で使用した超高真空・極低温環境で試料表面が観測可能な非接触原子間力顕微鏡について述べている。特に、サンプル温度が 10 K 未満の極低温環境を実現する冷却システムについて、10 K の実験に対する性能評価と、80 K の実験における液体窒素のバブリング対策について述べている。

第 4 章では、個々の原子のフォース・スペクトロスコピー方法を示し、Si(111)-(7x7) 表面上での短距離相互作用力を求めている。次に、Ge(111)-c(2x8) 表面上において、凹凸像やエネルギー散逸像が異なる場合の測定を行い、原子の短距離相互作用力を求めている。さらに、異なる探針先端モデルの理論計算値と実験で得られた短距離相互作用力との比較を行い、探針先端構造を決定している。

第 5 章では、NC-AFM による低温での力学的原子操作の実験結果を示している。Si(111)-(7x7) および Ge(111)-c(2x8) 表面を用い、力学的垂直原子操作（単原子引き抜きおよび付与）や、探針-試料間を近づけ相互作用力を増加させた状態でラビングやスクラッチを行うことによる原子操作の実験に初めて成功している。また、Ge(111)-c(2x8) 表面に吸着した原子との探針-試料間相互作用力の精密な制御による吸着原子の力学的水平原子操作の実験にも初めて成功している。

第 6 章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題や展望を述べている。

以上のように、本論文は極低温原子間力顕微鏡（NC-AFM）を用いて、個々の原子のフォース・スペクトロスコピーを測定し、さまざまな探針モデルを用いた場合の相互作用力の理論計算値と測定結果を比較することで探針の構造を決定し、原子の画像化機構やエネルギー散逸の有無を解明している。また、NC-AFM による力学的原子操作技術開発の第一歩として、Si(111)-(7x7) および Ge(111)-c(2x8) 表面上において垂直及び水平原子操作を行い、力学的原子操作が可能であることを初めて実証している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。