



Title	極低温原子間力顕微鏡を用いた酸化銅表面での原子操作と力学的分光に関する研究
Author(s)	木下, 幸則
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/59203">https://hdl.handle.net/11094/59203</a>
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">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

氏名	木下 幸則
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記番号	第 25487 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科精密科学・応用物理学専攻
学位論文名	極低温原子間力顕微鏡を用いた酸化銅表面での原子操作と力学的分光に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 菅原 康弘 (副査) 教授 小林 慶裕 教授 井上 康志 教授 松本 卓也

## 論文内容の要旨

本論文は、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた金属酸化表面における原子分子操作法の確立および発展を目的として、代表的な金属酸化物である酸化銅の表面における単一原子の力学的操作機構の解明および同表面における新規な力学的原子操作法の探索を行いその結果をまとめたものである。

第 1 章では、社会基盤を支える科学技術中で表面の特性を活用したものを紹介し、その発展には表面観察技術が重要であること説明した。また、表面観察技術の中核の一つとして、原子間力顕微鏡を取り上げ、これまでの原子間力顕微鏡の発展経緯と表面観察の歴史を概論した。そして、これまでに原子間力顕微鏡を用いて実証された原子分子操作の実証例を基板表面の種類および操作モードから分類し、今後様々な表面で制御性のある原子分子操作を実現するために克服すべき課題を取り上げ、本研究の目的と意義を明らかにした。

第 2 章では、原子間力顕微鏡の測定原理について説明した。まず、探針と試料表面間に働く 3 つの代表的な相互作用力であるファンデルワールス力、静電気力、化学的相互作用力を紹介し、それらの物理的起源と距離依存性について説明した。次に強制振動と探針・試料間の力を受けるカンチレバーの運動方程式から、カンチレバーの共振周波数と位相がシフトすることを導いた。また、共振周波数のシフト量と相互作用力の間に成立する定式を導出し、周波数シフトの物理的意味と力の距離依存性から、短距離で作用する化学的結合力を分離抽出する力学的分光法について説明した。

第 3 章では、本研究で使用した強磁場極低温原子間力顕微鏡の装置構成および回路構成について解説した。まず装置を構成する 5 つの真空チャンパー (導入室、処理室、交換室、観測室、低速電子線回折室) とクライオスタット、超伝導マグネット、除振機構について説明した後、光干渉計を用いた変位検出機構、原子間力顕微鏡用の探針、走査回路について説明した。

第 4 章では、汎用の高ドーピングシリコン (Si) 製探針の欠点を補完し、より再現性のある高分解能 AFM 測定を実現するために開発したタングステン (W) コート探針の作製方法について記した。次に汎用の超高真空 AFM 装置内で簡便に W 成膜するために開発したイオンビームスパッタ装置について、その構造、成膜原理の詳細を説明した。そして作製した W コート探針について、導電性測定、先端形状の観察、および AFM 観察における実使用による評価を行い、本手法による AFM 探針の W コートが AFM の高分解能化に極めて有効であることを示した。

第 5 章では、Cu(110)-O 表面の単一銅原子の水平操作に関わる化学的相互作用力とそのポテンシャルの 2 次元分布について、力学的分光法を用いて調べた結果を記した。探針先端の原子種に依存した力の 2 次元分布からは、表

面の同じ銅原子に対して、酸素原子で終端された探針は引力的に相互作用する一方、銅原子で終端された探針は斥力的に作用することを示した。この結果から、表面の銅原子を動かすためには、酸素原子探針では引力で引く張る操作モードが、銅原子探針では斥力で押す操作モードが最適であることを明らかにした。

第 6 章では、走査プローブ顕微鏡を用いて固体表面で実証されてきた 3 つの原子分子操作の操作モード ((1) 水平移動、(2) 垂直移動、(3) トンネル電子の注入を用いた吸着状態やスピン等の励起操作) の内、原子間力顕微鏡では未だ実証されていない励起操作が電子注入の起きないゼロバイアスの条件下で純粋に力学的に実現できるかを検証した結果について記した。実験結果の考察から、Co 原子と探針との距離を制御することで、単一の Co 原子をホップのない「安定状態」と絶えずホップを繰り返す「準安定状態」との間を可逆的に操作 (励起、脱励起) することが可能であることを示した。

第 7 章では、本研究の成果をまとめ、今後の展望について述べた。

## 論文審査の結果の要旨

原子をナノスケールの精度で操作し、新ナノ物質を思い通りに作り上げるためには、ナノスケールでの物質の自然法則を解明し、これを未来の実用技術に発展させる基礎研究が不可欠である。原子操作に関する研究は、これまで走査型トンネル顕微鏡が使われてきた。しかし、電気的方法に基づく走査型トンネル顕微鏡は、絶縁体を扱えない、原子間力を測れないなどの限界がある。他方、力学的手法に基づく原子間力顕微鏡は、絶縁体も扱える、原子間力を測れるなどの利点があり、次世代の原子操作のツールとして期待されている。本論文では、極低温環境下で動作する原子間力顕微鏡を用いて力学的な原子操作を実現するとともに、力学的分光法を用いてその機構を解明することを目的とした。

本論文における主な成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 試料表面として酸化銅 Cu(110)-O 表面を取り上げ、表面の力分布の探針先端原子種依存性を調べた。その結果、O 吸着探針の場合には、試料表面の Cu 原子近傍で強い引力が働くが、O 吸着探針の場合には、Cu 原子の隣の O 原子近傍で強い引力が働くことを明らかにした。このように探針・表面間の化学的相互作用が、探針先端の原子種に大きく依存することを見出した。
- (2) 酸化銅 Cu(110)-O 表面上での Cu 原子の水平操作の機構を解明するため、探針・試料間のポテンシャル分布を導出し、Cu 原子の吸着サイトと最近接サイト間のエネルギー障壁の大きさを検討した。その結果、O 吸着探針の場合には、探針・試料間距離が減少すると、引力相互作用により最近接サイトの表面ポテンシャルが大きく減少し、拡散障壁が減少するため、Cu 原子が水平移動することを見出した。他方、Cu 吸着探針の場合には、探針・試料間距離が減少すると、斥力相互作用により吸着サイトの表面ポテンシャルが大きく増加し、拡散障壁が減少するため、Cu 原子が水平移動することを見出した。
- (3) 原子間力顕微鏡による表面観察や原子操作を高安定に行うための探針の作製法について検討した。その結果、シリコン (Si) 製の探針先端を高融点材料であるタングステン (W) でスパッタリングコートすることにより、先端の曲率半径が 5 nm と極めて先鋭で構造安定な探針を実現できることを明らかにした。

以上のように、本論文は極低温環境下で動作する原子間力顕微鏡による原子操作と力学分光に関して実験的に研究したものであり、基礎的な面のみならず、応用の面でも有益な知見を得ており、応用物理学、特にナノ計測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。