

Title	極低温非接触原子間力顕微鏡の開発に関する研究
Author(s)	末平, 信人
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/42383
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	末 平 信 人
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 16237 号
学位授与年月日	平成13年3月23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	極低温非接触原子間力顕微鏡の開発に関する研究
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 教授 菅原 康弘

論文内容の要旨

本論文は、極低温非接触原子間力顕微鏡 (AFM) を開発し、その顕微鏡性能を実験的に検証した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、非接触 AFM の最適な測定環境が、極低温・超高真空であり、その環境下で測定できる非接触 AFM 開発の必要性を述べて、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) 検出方式による非接触 AFM の測定原理について詳細に述べ、探針と試料との間の力学的相互作用の寄与が、カンチレバーの共振周波数の変化として検出できることを述べている。次に、周波数シフトの理論的検出限界が温度の減少と共に下がることを説明して、極低温・超高真空環境下が非接触 AFM の最高の測定環境であることについて述べている。

第3章では、まず極低温・超高真空非接触 AFM には、3種類のクライオスタット方式が有ることを述べて、今回開発した新しいタイプの極低温・超高真空非接触 AFM の特徴と意義について説明している。次に、実際に製作した極低温・超高真空非接触 AFM の除振・冷却機能の性能について述べて、AFM ユニットの5 Kまで冷えて、14時間5 Kを保持出来ることと、除振性能は0.01nm以下であることを説明している。

第4章では、AFM ユニットの内部振動対策として、音響が伝わるのを防ぐために、音響インピーダンスの異なるものを利用する方法について述べている。また、その評価に用いた外部変位検出機構不必要な圧電体 PZT カンチレバーについて説明すると共に、PZT カンチレバーを用いた非接触 AFM で引力領域を確実に検出できることと単原子ステップの観察が出来ることを示した。

第5章では、高性能が期待できる光干渉方式の極低温・超高真空非接触 AFM について述べている。慣性駆動方式を用いた3次元の光ファイバー位置調整機構の構成と位置調整の手順について説明して、波長の8分の1の距離で信号雑音比 (S/N) が最大になることを示した。つぎに、周波数ノイズを小さくするには、カンチレバーの温度を下げる必要があり、高感度な光検出回路の開発の必要性について説明した。さらに、アバランシェフォトダイオードとピンフォトダイオードを用いた光検出回路の S/N について理論的検討を行い、実験的に比較した結果、光電流が小さい領域ではアバランシェフォトダイオードの方が S/N が良いことを示した。最後に、光干渉方式の極低温・超高真空非接触 AFM の性能評価を行い、カンチレバーの Q 値が温度の低下と共に上がることを示した。周波数ノイズを測定して、低温にすると周波数ノイズが減少することと、理論と比較した結果さらに周波数ノイズを減少できる可能

性が有ることを示した。また、Si (111) 7 x 7 再構成表面の極低温環境下での測定を行い、0.01nm の垂直分解能が有ることと、アダトムの中間に凹凸が観測されることを示した。さらに、極低温環境下で Si (111) 7 x 7 再構成表面と Si 探針との間に電圧パルスを印加して、Si 原子を数個引き抜いて極低温・超高真空非接触 AFM でも原子分子操作できることを示した。

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

本研究では、極低温環境下では、熱揺らぎによる周波数ノイズが減少して、さらに、熱ドリフトも減少し、また、原子や分子がうごきまわらなくなるため原子分解能顕微鏡である非接触 AFM にとって極低温は最高の測定環境であることに着目して、極低温環境下で測定できる光干渉方式の極低温・超高真空非接触 AFM 開発を行っている。そのために、極低温環境の実現に効果的な冷却・断熱システムの開発、極低温で原子分解能観察をするための除振システム、極低温環境下でも動作する慣性駆動方式アプローチ機構の開発、AFM ユニットの内部振動対策、超高感度な光干渉方式 AFM の開発を行い、その結果、5 K まで冷却でき、5 K を 14 時間保持できることを確認している。次に、極低温・超高真空非接触 AFM の顕微鏡性能を明らかにすることを目的として、極低温で非接触 AFM 測定による Si (111) 7 x 7 再構成表面の観察に成功して、さらに非接触 AFM で Si 原子の引き抜きが可能であることを明らかにしている。主要な成果を要約すると次の通りである。

- (1) トップバス型クライオスタットを用いて、3 重シールド、2 重シャッター機構により輻射熱をほぼ完全に遮断することにより、2 m 以下の高さで、探針・試料交換が容易で、5 K まで冷却でき、14 時間最低温度を保持できる極低温・超高真空非接触 AFM の開発に成功した。
- (2) 空気バネ除振を用いた外部除振システムと渦電流ダンパーを用いた 1 段バネ吊り除振機構を併用して、極低温・超高真空非接触 AFM で 0.01nm の除振性能を実現している。
- (3) 極低温環境下でも、外部からの遠隔操作ができる慣性駆動方式アプローチ機構を開発して、オングストロームオーダーで探針を試料にアプローチできる性能を実現した。
- (4) カンチレバーホルダーと AFM 本体の間に音響インピーダンスの異なるテフロンを挿入することにより、カンチレバーホルダーに伝わる振動を反射できることを明らかにしている。
- (5) 極低温環境下で、ファイバーをカンチレバー背面に 4 mm 離れた位置から、0.1 ミクロンの精度でアプローチできる 3 次元のアライメント機構を開発して、熱振動による 0.01nm の振動振幅を測定できる高い S/N を有する光干渉方式極低温・超高真空非接触 AFM の開発に成功した。
- (6) カンチレバーの Q 値は温度に依存して、温度が下がるほど Q 値が上がることを明らかにしている。また、周波数ノイズは温度を下げるにより常温より 41% 下がったことと、さらに 52% 下げられる可能性があることを明らかにしている。
- (7) 極低温環境下での非接触 AFM 測定により、Si (111) 7 x 7 再構成表面の原子分解能観察に成功して、0.01nm の垂直分解能を持つことを明らかにしている。また、アダトムの間に凹凸が存在することと、レストアトムの位置とは一致しないことも明らかにしている。
- (8) 光干渉方式極低温・超高真空非接触 AFM を用いて、極低温環境下で Si (111) 7 x 7 再構成表面と Si 探針の間に電圧パルスを印加することにより、Si 原子を数個引き抜いて、非接触 AFM でも原子分子操作できることを明らかにしている。

以上のように、本論文は極低温環境下で原子分解能観察が可能な非接触 AFM の開発を目的として、光干渉方式極低温・超高真空非接触 AFM システムを開発し、探針や試料の交換が容易で、5 K まで冷却でき、14 時間最低温度を保持できるクライオスタットの開発に成功している。また、極低温環境下で Si (111) 7 x 7 再構成表面の超高分解能の表面観察を達成し、さらに、電圧パルスを印加することにより非接触 AFM で Si 原子を引き抜くことにも成功している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。