

学位論文題名

Experimental study of tip-induced surface relaxation
on GaAs (110) surface

(GaAs (110) 表面における探針誘起表面原子緩和に関する研究)

学位論文内容の要旨

従来、集積回路におけるデバイスの微細化や高集積化を牽引してきたのは、トップダウン方式による加工技術である。これはリソグラフィやエッチングを用いた微細加工する技術である。2007年には65nmのテクノロジーノードでの量産が計画され、45nm、32nm技術世代に向けての関連した技術開発も進められている。しかしながら、トップダウン方式のみで、これを超える微細加工を実現するのは困難であると考えられている。一方で、原子・分子を1個単位でその位置や結合状態を制御して微細構造を形成するボトムアップ方式の加工技術が研究されている。トップダウン方式の加工技術は目的の構造を削りだすことを主としているのに対し、ボトムアップ方式では原子や分子を1個ずつ組み立てて目的の構造を作り出すことを目指している。両方式ともに、ナノスケールで構造を制御することで、目的とする機能や新しい機能の創成を試みるナノテクノロジーへのアプローチである。

このようなナノテクノロジーにおいては、原子スケールで構造や物性を評価することが必要となる。原子分解能で表面を観察し、表面原子を操作することも可能な手法として走査型プローブ顕微鏡法(Scanning Probe Microscopy: SPM)がある。SPMは鋭い先端をもつ探針の先端原子と試料表面の原子との間に働く短距離相互作用を測定することで原子分解能観察を可能にしている。プローブの先端原子とバルク表面原子との間に働く相互作用の種類によってそれぞれ固有の名称を持つSPMがあり、非接触原子間力顕微鏡(non-contact Atomic Force Microscopy: NC-AFM)もその一つである。NC-AFMは探針先端原子と試料表面原子の間に働く短距離相互作用力を測定するもので、試料の導電性の有無に関わらず原子分解能での表面状態の観察が可能で、金属から高分子に至るまでの広範囲な試料に適用できる。また、探針直下の試料表面原子に大きな相互作用を局所的に加えることもでき、原子1個単位で操作するアトムマニピュレーションや、表面原子の位置を緩和させることが可能であり、表面の結合状態や原子種分析への応用が期待される。

本研究では、GaAs(110)清浄表面を試料としたNC-AFM測定結果に基づいて、原子分解NC-AFM像の探針-試料間距離依存性、局所的相互作用力の探針の巨視的構造依存性について考察し、探針先端原子と探針直下の試料表面原子との間に働く相互作用による表面原子の緩和の詳細について明らかにした。

探針試料間相互作用による試料表面原子位置の緩和、すなわち tip-induced relaxation は NC-AFM 測定では常に考慮する必要があるが、詳しい研究は行われていなかった。本研究では、SPM の一つである走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscopy: STM)による研究がなされており、表面構造の計算による研究も多い GaAs(110)表面を研究対象とした。GaAs(110)表面では、探針先端原子が直接相互作用を及ぼせる位置に、異なる2種類の原子があり、清浄面では僅かに緩和し

ている構造をとっていることから、tip-induced relaxation も容易に観察できると期待される。また、探針試料間に働く相互作用力の起源には複数あるが、それらはそれぞれ異なる相互作用距離依存性を示すため、tip-induced relaxation の探針試料間相互作用の測定を介して、これらの弁別が可能である。実際には、探針試料間距離に対する NC-AFM 像の変化を測定することにより、これらの解析を行った。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。①GaAs(110)表面観察において室温での NC-AFM 測定でも Ga 原子と As 原子の 2 種類の原子が同時に観察できることを初めて示した。②また、Ga 原子は探針との相互作用力の大きさに応じて tip-induced relaxation を起こすことを NC-AFM 像から検証した。③探針先端原子と試料表面原子との相互作用力により生じる tip-induced relaxation の大きさと探針試料間相互作用力との関係を明らかにした。さらに、④相互作用力の距離依存性から、tip-induced relaxation の効果を抽出し、その詳細を議論した。これらの成果について下記の論文構成のもとに論述した。

第一章では、本研究の背景を述べた。近年のナノテクノロジーの発展における観察技術の重要性についてまとめた。また、本研究で使用される走査型プローブ顕微鏡の特徴ならびに NC-AFM 技術の研究状況について論述した。

第二章では、NC-AFM についてその動作原理と探針試料間に働く力について議論した。

第三章では、NC-AFM 測定における標準試料たる Si(111)7x7 表面と、測定対象である GaAs(110) 表面についてその構造と理論的な研究の状況についてまとめ、本研究の重要性を論述した。

第四章では、本研究でおこなった実験において、試料の準備やカンチレバーのパラメータ決定方法について述べた。

第五章では、GaAs(110)表面の NC-AFM 観察における探針試料間距離依存性から、探針の巨視的構造依存性について考察した。

第六章では、GaAs(110)表面の NC-AFM 観察結果について述べた。これまでに報告されてきた As 原子のみが観察された NC-AFM 像と Ga 原子と As 原子の両方が観察される NC-AFM 像との比較検討を行い、その違いを考察した。

第七章では、GaAs(110)表面の NC-AFM 観察結果を詳細に検討することで、tip-induced relaxation が NC-AFM 像に反映していることを示し、その探針試料間相互作用力依存性について議論した。

第八章では、GaAs(110)表面の NC-AFM 観察時における探針試料間相互作用の距離依存性について議論を行った。その結果、tip-induced relaxation の有無を、探針試料間相互作用の距離依存性曲線における特異点の有無から判別できることを見出した。

第九章では、本研究を総括し、本研究成果より期待される将来展望について記した。

本論文は、ボトムアップ方式のナノテクノロジーに必要な不可欠なツールである非接触原子間力顕微鏡を用いて、探針試料間相互作用の結果の一つである tip-induced relaxation について考察したもので、本結果は NC-AFM を用いたナノ計測技術に必要な基礎的な知見を与えるとともに、ボトムアップ方式のナノテクノロジーに貢献するところ大なるものがある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 岡 和 久

副 査 教 授 山 本 眞 史

副 査 教 授 高 橋 庸 夫

学 位 論 文 題 名

Experimental study of tip-induced surface relaxation on GaAs (110) surface

(GaAs (110)表面における探針誘起表面原子緩和に関する研究)

従来、集積回路におけるデバイスの微細化や高集積化を牽引してきたのは、トップダウン方式による加工技術である。しかしながら、トップダウン方式のみで、これを超える微細加工を実現するのは困難であると考えられている。一方で、原子・分子を1個単位でその位置や結合状態を制御して微細構造を形成するボトムアップ方式の加工技術が研究されている。トップダウン方式の加工技術は目的の構造を削り出すことを主としているのに対し、ボトムアップ方式では原子や分子を1個ずつ組み立てて目的の構造を作り出すことを目指している。両方式ともに、ナノスケールで構造を制御することで、目的とする機能や新しい機能の創成を試みるナノテクノロジーへのアプローチである。

このようなナノテクノロジーにおいては、原子スケールで構造や物性を評価することが必要となる。原子分解能で表面を観察し、表面原子を操作することも可能な手法として走査型プローブ顕微鏡法(Scanning Probe Microscopy: SPM)がある。SPMは鋭い先端をもつ探針の先端原子と試料表面の原子との間に働く短距離相互作用を測定することで原子分解能観察を可能にしている。プローブの先端原子とバルク表面原子との間に働く相互作用の種類によってそれぞれ固有の名称を持つSPMがあり、非接触原子間力顕微鏡(non-contact Atomic Force Microscopy: NC-AFM)もその一つである。

NC-AFMは探針先端原子と試料表面原子の間に働く短距離相互作用力を測定するもので、試料の導電性の有無に関わらず原子分解能での表面状態の観察が可能で、金属から高分子に至るまでの広範囲な試料に適用できる。また、探針直下の試料表面原子に大きな相互作用を局所的に加えることもでき、原子1個単位で操作するアトムマニピュレーションや、表面原子の位置を緩和させることが可能であり、表面の結合状態や原子種分析への応用が期待される。

本論文では、GaAs(110)清浄表面を試料としたNC-AFM測定結果に基づいて、原子分解NC-AFM像の探針-試料間距離依存性、局所的相互作用力の探針の巨視的構造依存性について考察し、探針先端原子と探針直下の試料表面原子との間に働く相互作用による表面原子の緩和の詳細について明らかにしている。

探針試料間相互作用による試料表面原子位置の緩和、すなわちtip-induced relaxationはNC-AFM測定では常に考慮する必要があるが、詳しい研究は行われていなかった。本研究では、SPMの一

つである走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy: STM) による研究がなされており、表面構造の計算による研究も多いGaAs(110)表面を研究対象とした。GaAs(110)表面では、探針先端原子が直接相互作用を及ぼせる位置に、異なる2種類の原子があり、清浄面では僅かに緩和している構造をとっていることから、tip-induced relaxationも容易に観察できると期待される。

また、探針試料間に働く相互作用力の起源には複数あるが、それらはそれぞれ異なる相互作用距離依存性を示すため、tip-induced relaxationの探針試料間相互作用の測定を介して、これらの弁別が可能である。実際には、探針試料間距離に対するNC-AFM像の変化を測定することにより、これらの解析を行なっている。

本論文で得られている主な成果は次の通りである。①GaAs(110)表面観察において室温でのNC-AFM測定でもGa原子とAs原子の2種類の原子が同時に観察できることを初めて示した。②また、Ga原子は探針との相互作用力の大きさに応じてtip-induced relaxationを起こすことをNC-AFM像から検証した。③探針先端原子と試料表面原子との相互作用力により生じるtip-induced relaxationの大きさと探針試料間相互作用力との関係を明らかにした。さらに、④相互作用力の距離依存性から、tip-induced relaxationの効果を抽出し、その詳細を議論した。これらの成果について下記の論文構成のもとに論述した。

第一章では、近年のナノテクノロジーの発展における観察技術の重要性についてまとめ、本研究で使用される走査型プローブ顕微鏡の特徴ならびにNC-AFM技術の研究状況について論述している。

第二章では、NC-AFMについてその動作原理と探針試料間に働く力について議論されている。

第三章では、NC-AFM測定における標準試料たるSi(111)7x7表面と、測定対象であるGaAs(110)表面についてその構造と理論的な研究の状況についてまとめ、本研究の重要性が述べられている。

第四章では、本研究の実験において、試料の準備やカンチレバーのパラメータ決定方法について述べられている第五章では、GaAs(110)表面のNC-AFM観察における探針試料間距離依存性から、探針の巨視的構造依存性について考察している。

第六章では、GaAs(110)表面のNC-AFM観察結果について述べ、これまでに報告されてきたAs原子のみが観察されたNC-AFM像とGa原子とAs原子の両方が観察されるNC-AFM像との比較検討を行い、その違いが考察されている。

第七章では、GaAs(110)表面のNC-AFM観察結果を詳細に検討することで、tip-induced relaxationがNC-AFM像に反映していることを示し、その探針試料間相互作用力依存性について議論されている。

第八章では、GaAs(110)表面のNC-AFM観察時における探針試料間相互作用の距離依存性についての議論が行なわれている。その結果、tip-induced relaxationの有無を、探針試料間相互作用の距離依存性曲線における特異点の有無から判別できることを見出した。

第九章では、本研究を総括し、本研究成果より期待される将来展望について述べられている。

これを要するに、本研究は、ボトムアップ方式のナノテクノロジーに必要な不可欠なツールである非接触原子間力顕微鏡(NC-AFM)を用いて、探針試料間相互作用の結果の一つであるtip-induced relaxationについて考察したもので、NC-AFMを用いたナノ計測技術に必要な基礎的な知見を与えるとともに、ボトムアップ方式ナノテクノロジーの進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。