

走査プローブ顕微鏡の開発と半導体表面研究への応用

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 北村, 真一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/1174

氏名・(本籍)	北 村 真 一 (埼玉県)	443
学位の種類	博 士 (工 学)	
学位記番号	工博甲第 272 号	
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 24 日	
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当	
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子材料科学	
学位論文題目	走査プローブ顕微鏡の開発と半導体表面研究への応用	
論文審査委員	(委員長) 教授 田 部 道 晴 助教授 村 上 健 司 教授 立 岡 浩 一 教授 福 田 安 生	

論 文 内 容 の 要 旨

1981年にBinnigらにより開発された走査トンネル顕微鏡(STM)は、直接実空間の原子配列が観察できる画期的な顕微鏡であり、開発以来急速に普及し、表面科学の分野に多大な貢献を与えた。STMは、金属探針を試料表面の極近傍まで近づけたときに流れるトンネル電流を検出することで原子オーダーの分解能を得ているため、基本的には導電性試料の観察に適している。

STMの開発からわずか5年後に開発された原子間力顕微鏡(AFM)は、探針-試料間に働く原子間力を検出するため、探針、試料ともに導電性の必要がなく、絶縁体試料の観察も可能である。またAFMはSTMに比べ大気中でも比較的安定動作するため、その利用範囲は格段に広がり、摩擦(FFM)/粘弾性(VE-AFM)/磁気(MFM)/表面電位(SKPM)/静電容量(SCM)等様々な情報をも画像化できる顕微鏡へ発展し、現在ではSTMやAFMを含め走査プローブ顕微鏡(SPM)として多くの研究者に利用されている。

超高真空(UHV)STMでは、大気中で観察できない比較的活性な半導体表面も比較的容易に原子レベルの観察が可能である。一方、UHV-コンタクトAFMでは探針-試料間の相互作用が過剰となり、そのような比較的活性な半導体表面の原子像観察は不可能であった。ノンコンタクトAFM(NC-AFM)は、その過剰な相互作用を軽減できるが、原子像観察には至っていなかった。

そこで本研究では、半導体表面において、研究開始当初まだ誰もなしえなかった860℃の高温下でのUHV STMによる原子像観察、及び原子像観察可能なUHV NC-AFMの開発とその応用について研究し、以下のことを明らかにした。

1. Si(111)表面における $1\times 1 \leftrightarrow 7\times 7$ 相転移温度(860℃)付近でのSTM観察の結果、ステップ上段のテラスで 7×7 構造が原子レベルの分解能で観察され、ステップ下段のテラスでは周期的な構造がな

い表面が観察された。860℃付近で温度を徐々に下げたときの連続STM観察からは、7×7構造はステップエッジの上段から同じテラスのステップ下段に成長し、テラス全体を覆うことが分かった。また、7×7構造が支配的になってくると、そのステップエッジは7×7ユニットの一辺に沿って直線的になってくることが分かり、3方向のステップが取り得ることが考えられた。直線的に揃ったステップエッジは7×7ユニット単位で揺らいでいることが分かり、7×7構造が全面を完全に覆った840℃の表面においても、その現象が確認された。

2. 一定加振方式のFM検出を用いたUHV NC-AFMを開発し、既にSTMで原子像観察されているSi(111)7×7構造、Si(100)2×1構造の観察、及びSTMでは観察不可能なサファイアとポリプロピレンの結晶表面の観察を行った。その結果、Si表面の観察ではSTMと同様な構造がNC-AFMで観察された。Si(100)2×1構造ではダイマーの個々の原子まで分離できており、STM以上の分解能が得られた。サファイア(1000)表面において原子像観察までには至らなかったが $3\sqrt{3}\times 3\sqrt{3}$ 構造と $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ 構造といった長周期構造が観察でき、ポリプロピレンフィルムにおいてはポリプロピレンの分子鎖が明瞭に観察できた。このように、UHV NC-AFMではSTMと同等か、それ以上の高分解能観察が可能であることが分かった。

3. Si(111)7×7構造、Si(100)2×1構造、及び酸素を吸着させたSi(111)7×7構造においてSTM像とNC-AFM像との比較を行った。STM観察では試料バイアス電圧の極性によっても画像が異なるように、幾何学的な表面形状以外の情報が含まれた画像となる。一方、NC-AFMでは静電気力の影響を無視すれば、幾何学的な表面形状をより正確に反映しているものと考えられ、Si(100)2×1表面のようにより平坦な表面においてはSTM以上の水平方向の分解能が得られるため、より正確な表面構造を解析できる可能性が示された。また酸素を吸着させた表面においてもSTMとNC-AFMを比較しながら表面形状を解析することで、正確な表面形状が把握できるだけでなく、吸着状態も予測できる可能性を示すことができた。

4. 原子像観察可能なUHV NC-AFMと同様に、比較的硬いカンチレバーを用いて静電気力の勾配を検出する方式のUHV SKPMを開発した。Ag及びAuを蒸着したSi(111)7×7表面の表面電位観察では、10meV程度の電位分解能で原子レベルの電位分布を観察することができた。原子レベルの電位分布は表面の局所電子密度を反映していると解釈することで説明でき、一般的な仕事関数との比較とは必ずしも一致しないことがわかった。一方、一般的な仕事関数との関係はCPD像のバックグラウンドの値がそれを反映しており、同じp型の基板においてAuの被覆率が大きい程仕事関数が大きく、また同じ被覆率ならばn型よりp型の方が仕事関数が大きいという結果が得られ、一般的に考えられる仕事関数の大小関係と一致した結果であった。

高温下で起こる化学的・物理的な現象や年々微細化するデバイス開発に欠かすことのできない薄膜成長のメカニズムを解明するためには、その場観察による原子スケールの構造解析が非常に重要な役割を果たす。また、より実用的な試料には必ず絶縁体が含まれるようになり、このような試料に対しても原子スケールでの構造解析が必要となる。従って、本研究で800℃を越える高温下での原子スケールでの構造解析が可能であり、又、絶縁体に対してもUHV NC-AFMによりSTMと同様な原子ス

ケールでの構造解析が可能であることを立証できたことは、非常に大きな成果であり、高温STMは現在では温度可変SPMとして多くの研究者が利用している。

論文審査結果の要旨

Binnig らによる走査トンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscope) の開発は原子 1 個を視覚化出来ることで画期的であった。又、原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) の開発は絶縁物表面の原子像が観察可能な装置として脚光を浴びた。しかし、前者では高温における観察は不可能であった。後者では非接触で超高真空での明瞭な原子像の観察には成功していなかった。本研究ではこれらの問題を解決するために装置の改良・開発を行い、半導体などの表面研究に応用した。以下に本論文について述べる。

第 1 章に STM, AFM の歴史について、第 2 章に開発した STM, AFM 装置について述べている。第 3 章では Si(111) 表面を高温 (840-880°C) で観察した結果を述べている。Si(111) 表面における $1 \times 1 \rightarrow 7 \times 7$ 相転移 (860°C) において温度減少に伴い 7×7 構造はステップエッジの上段から同じテラスのステップ下段に成長する。 7×7 構造が支配的になると、そのステップエッジは 7×7 ユニットの一辺に沿って揃い、ステップエッジは 7×7 ユニット単位で揺らいでいることが分かった。第 4 章では開発した非接触 (NC) 超高真空 AFM を用いた観察結果を述べている。Si(100) 2×1 構造における Si ダイマーの個々の原子まで観察することが出来た。サファイア (1000) においては $3\sqrt{3} \times 3\sqrt{3}$ と $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 長周期構造、ポリプロピレンフィルムではポリプロピレンの分子鎖が明瞭に観察できた。第 5 章では STM 像と NC-AFM 像を比較し、以下の結果を得た。STM 像より非接触 AFM 像の方が幾何学的な表面形状を反映しており、より正確な表面構造が解析できる可能性が示された。また酸素を吸着させた表面では、吸着状態も予測できることを示すことができた。第 6 章では静電気力の勾配を用いた超高真空走査ケルビンプローブ顕微鏡 (SKPM: Scanning Kelvin Probe Microscope) による Ag 及び Au を蒸着した Si(111) 7×7 の表面電位観察を行い、以下の結果を得た。即ち、10meV 程度の電位分解能で原子レベルの電位分布を観察することができた。原子レベルの電位分布は表面の局所電子密度を反映し、その画像のバックグラウンドの値が仕事関数を反映していると考えられた。第 7 章では本研究で得られた結果がまとめられている。

以上の研究は従来の STM, AFM の限界を突破するものであり、表面工学の分野において多大な貢献をした。従って、本論文は博士 (工学) を授与するに充分であると認める。