

## 審査の結果の要旨

論文提出者: 平家 誠嗣

本論文は、走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた Si(111)-7x7 表面におけるナノファブリケーション技術と、それを応用して 7x7 再配列表面の表面準位を介した電気伝導度測定を行った結果をまとめたものである。具体的には、探針-試料表面間に大電流を印加することにより、Si 原子を引き抜くと同時に表面準位の除去が可能であることに着目し、Si 表面に原子引き抜きパターンを描画して表面準位を介した電気伝導経路を制御することにより、表面準位電気伝導度を評価することを目的とする。

本論文は8つの章により構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章では STM ナノファブリケーション及び Si 表面物性の基礎について述べられている。本研究で用いられた表面加工のメカニズムとして電界蒸発を取り上げて説明している。また、Si(111)-7x7 表面において特徴的な表面準位及び、それに伴って形成されているショットキー障壁に関する説明がなされ、これまでに報告された表面準位電気伝導度測定の研究例が紹介されている。

第2章では、本研究で開発した STM システムのハードウェアおよびソフトウェアの構成に関する説明がなされている。特に、本システムの特筆すべき点として、割り込みを用いたソフトウェアによるフィードバック制御、及び、比較的簡単な記述で STM を制御可能なマクロ言語を用いて、複雑なパターン描画や特殊な測定方法にも対応した描画プログラムに関する説明がなされている。

第3章では、ナノファブリケーションによるパターン描画方法について述べている。探針-試料間に比較的低電圧を印加しながら数 100nA 程度の大電流を流すことにより、表面の Si 原子を引き抜き、探針の軌跡に沿って溝パターンを描画できることが示されている。また、トンネルスペクトルから、溝内部では Si 表面のダングリングボンドに由来する表面準位がほぼ完全に消去されていることが明らかにされている。さらに、パターン描画メカニズムを電界蒸発の観点から考察している。

第4章では、パターン描画の精度を向上させるために新たに開発した STM 探針先端形状のその場評価の手法に関して述べている。具体的には、探針-試料間の高電圧印加により試料表面に形成した高さ 10 数 nm、直径数 nm のナノニードルを用いて、逆に探針先端を走査し STM 像を得るという手法である。STM 探針先端と STM 像を比較した結果、原子分解能が探針先端のミニティップによるものであることが初めて示されている。また、ナノニードルの形成メカニズムを電界蒸発および表面拡散の観点から考察している。さらに、印加する電圧の符号を反転させると、探針先端にナノニードルが形成されることを見出している。

第5章では、ナノニードルを用いて探針先端形状を観察し、その違いが溝パターンへ与える影響を調べた結果に関して述べている。探針先端形状を変化させる過程の各段階で、探針先端形状の評価および描画パターンの観察を行い、両者を比較することにより、探針の曲率半径と描画パター

ンの幅およびコントラストに相関があることを明らかにしている。

第6章では、溝パターンの電気的な特性を利用して、Si(111)-7x7 の表面準位を流れる電流経路を制御し、それに付随して現れる現象に関して述べている。溝パターン内には表面準位が存在しないため、完全に閉じた図形パターンを描画すると、パターン内部の表面準位は外部から切り離される。さらに、表面準位-バルク間もショットキー障壁により電流経路が断たれているため、パターン内部ではコンダクタンスが低下し、STM 像が見かけ上低く観察されることを実験的に示している。また、閉じたパターンの内部では、新たなパターン描画やナノニードル形成が行なえなくなるという現象も見出されており、この現象に関しては、Si(111)-7x7 表面の表面準位が本来持っている電界の遮蔽効果の観点で考察している。

第7章では、第6章の技術を応用して Si(111)-7x7 表面の表面準位を介した電流経路の電気伝導度測定を行なった結果について述べている。一端が閉じてない「コ」の字型の溝パターンを描画し、その内部に一端が外部と接続されたテープ状の清浄表面を残した。テープ構造の端に近づくほどコンダクタンスが低くなるため、STM 像が低下して観察される。STM 像の見かけの高さをテープ構造上での電圧降下に換算することにより得られた電圧降下の位置依存データを、テープ構造の電気的なモデルから導出された式でフィッティングすることにより、表面準位電気伝導度を見積もった結果、 $10^{-8} \Omega^{-1}/\text{cm}$  という値を導いている。この値は、これまでに報告されている値と比較して 1-2 桁程度低く、この違いはバルクからの寄与を完全に排除できた結果であると説明している。また、非常に低い電気伝導度の原因を、7x7 構造におけるキャリアの局在による移動度の低下の観点から考察している。

第8章では、本論文の結論が述べられており、本研究で明らかとなった、STM ナノファブリケーションに関連する現象、及び、Si(111)-7x7 表面における表面準位電気伝導に関する知見の総括が述べられている。

以上のように本論文で著者は、STM によるナノファブリケーション技術を確立し、その技術を用いて Si(111)-7x7 表面における表面準位を介した輸送特性の解明において極めて有意義な知見を得ている。これは、この分野の基礎学術的な発展のみならず、近年めざましい発展を遂げている半導体の微細化技術への応用において、その進展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認められる。