

論文の内容の要旨

論文題目 走査トンネル顕微鏡によるナノファブ리케이션とその応用
氏 名 平家 誠嗣

走査トンネル顕微鏡 (STM) の発明以来、半導体表面の原子レベルの構造や局所的な電子状態の研究が盛んに行われるようになった。さらに、STM 探針を用いて個々の表面原子を操作したり、表面形状をナノメートルオーダーで加工するナノファブ리케이션技術が注目され、次世代の情報処理デバイスへの応用が期待されている。本研究では、STM 探針を用いた Si(111)-7×7 表面の微細加工技術を基礎として、Si 表面の表面準位電気伝導の制御、及び表面準位を介した電気伝導度の測定を行った。

Si 表面の加工は、数 V 程度の通常のバイアス電圧下で探針-試料間に 100nA 程度の大電流を印加することにより行った。この条件で探針を移動させると、表面の Si 原子が引き抜かれ、幅数 nm、深さ 0.1-0.2nm 程度の溝状のパターンが形成される。電流・電圧条件を変えてパターン幅を調べたところ、探針-試料間距離を考慮すると、試料表面における電界強度がパターン幅と関連していることが示され、電界蒸発による原子の引き抜きであることが示唆された。パターン幅は探針先端の形状にも依存し、より微細な加工を行うためには鋭い探針が求められる。そこで、探針先端のその場評価を行うための手法を新たに開発した [1]。Si 表面において探針電圧を -10V 程度まで徐々に上げると、引き抜かれた Si 原子が表面の探針直下に集まり、直径 2-3nm、長さ 10 数 nm 程度の針状の構造 (ナノニードル) が形成される (図 1(a))。この構造は探針先端の形状と比較して極めて先鋭であるため、図 1(b) に模式的に示したように、探針でナノニードル上を走査すると、逆に探針先端の形状が STM 像として観察できる。この手法を用いて探針形状と描画パターンを比較すると、描画ラインは探針の形状を反映した幅やパターンとなることが確認された。また、探

針先端の状態と STM 像との関係を調べたところ、探針先端に原子 1 個程度の突起 (ミニティップ) が存在する場合に原子分解能が得られることが示された。さらに、逆符号の印加電圧を用いると、探針先端にナノニードルが形成され、探針の先鋭化が行えることが分かった。

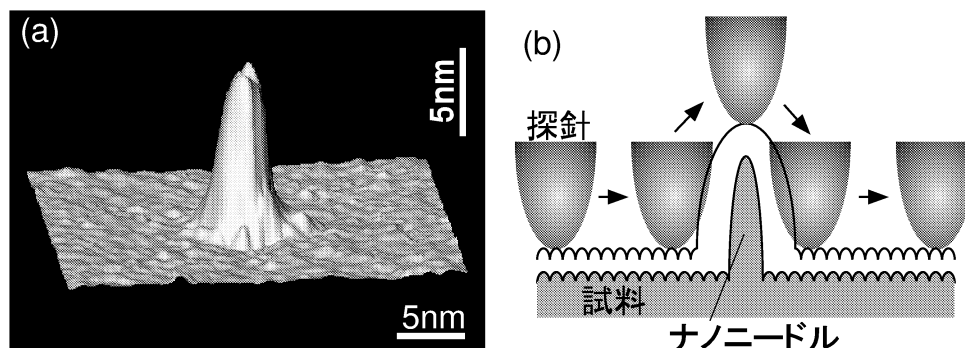


図 1: (a) ナノニードルの STM 像、(b) 探針先端の観察原理

描画パターンの重要な特徴として、加工された表面の電気的な特性の変化が挙げられる [2]。Si(111)-7×7 再配列表面には多数のダングリングボンドが存在するため、バンドギャップ内に表面準位を持つ。ところが、パターン描画後の溝内部では完全なバンドギャップが観察され、表面準位が消失していることが分かった。そのため、表面準位を介した伝導経路が溝パターンによって阻害されることが予想された。さらに、7×7 表面では表面準位によりフェルミ準位がピン止めされ、表面準位-バルク間にショットキー障壁が形成されているため、表面準位内の電子はバルクへ流れにくくなっている。そこで、完全に閉じた図形パターンを描画することによりパターン内部の Si 表面を外部から孤立させた場合、パターン内部の表面準位は溝ラインとショットキー障壁により電氣的に分離されると考えられる。図 2 は直径 100nm の円形パターンを描画し、2 種類のバイアス電圧で STM 観察した結果である。図 2(a) は探針電圧が負で、ショットキー障壁に対して逆バイアスになる方向であり、(b) は順方向である。逆バイアス時は、明らかにパターン内部表面が外部よりも低く観察され、その差は 0.1nm に達した。順バイアスの場合にも 0.01nm 程度の変化が見られるが、あまり顕著ではない。これは、探針からパターン内部の Si 表面にトンネルした電子が、高抵抗の溝とショットキー障壁により伝播経路を失い、パターン内部がチャージアップしているものと思われる。そのため、探針-試料間の実効的なバイアス電圧が低下し、探針が表面に接近して STM 像が低く観察された。一方、順バイアスにおいてはショットキー界面が ON 状態となり、チャージアップが低減されていると考えられる。

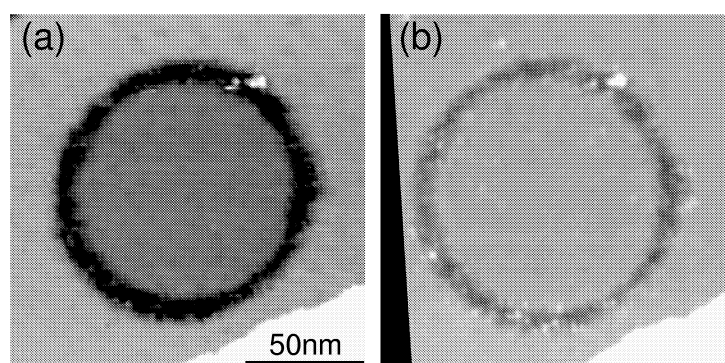


図 2: 閉パターンの STM 像の電圧極性依存、(a)-2.0V、(b)+2.0V

次に、溝パターンにより表面準位内を伝播する電流経路を制御できることから、適当なパターン形状を選ぶことにより、その電流経路に異方性を持たせることができると考え、そこから表面準位電気伝導度の評価を試みた [3]。完全には閉じていない「コ」の字型の溝パターンを描画し、その内部に一端が外部表面に接続された幅 18nm、長さ 390nm のテープ状の表面を残した。STM 探針からテープ構造の表面に注入された電子は外部に接続された方向に流れやすくなると予想される。図 3 は描画したテープ構造の STM 像および断面図である。バイアス電圧が順方向の時 (図 3(a)) は、チャージアップによるテープ表面の低下が見られるものの、テープ上の位置には依存しない。一方、逆バイアスの場合 (図 3(b))、表面からバルクへ抜ける電流経路が制限されるため、電流はテープ内の表面準位を流れて接続部へ向かわざるを得なくなる。そのため、探針位置がテープの端に近づくにつれ、表面準位を介した電流経路が長くなり抵抗値が増し、チャージアップが大きくなった結果、STM 像としてはより低く観察されている。ここで、電流値が一定の場合、探針-試料間距離がバイアス電圧で一意的に決まることから、逆に STM 像の高さ情報から実効的なバイアス電圧を見積もった。その結果、図 3(b) の場合のテープパターンに沿った電圧降下の分布が得られ、テープ端では 0.6V に達していることが分かった。

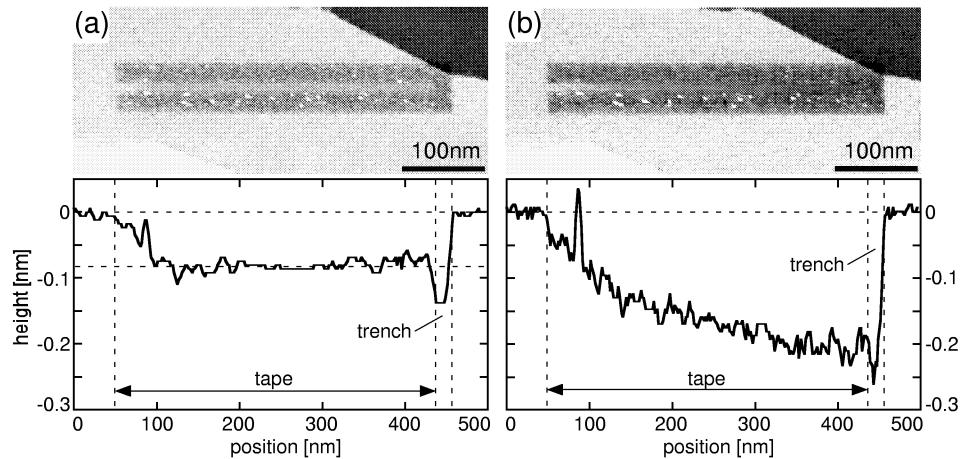


図 3: テープパターンの STM 像、(a) $V_{bias} = +2.0V$ 、(b) $-2.0V$

実際には、テープ部分から溝部分やバルク界面をリークして流れる電流があるため、それらを考慮してテープ構造の一次的なモデルを考えた。それを用いて電圧降下分布に対しフィッティングを行うことにより、表面準位を介した電気伝導度が $10^{-8}\Omega^{-1}/\square$ 程度と見積もられた。この値は、これまでの報告例よりも 2 桁低い値であったが、測定方法が異なるため単純には比較できない。しかし、Si(111)- 7×7 表面のダングリングボンド間の間隔の広さ等から、表面準位内のキャリア移動度が低いことが予想され、本研究で得られた低い電気伝導度の要因の一つと考えられる。

参考文献

- [1] S. Heike, T. Hashizume and Y. Wada, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L1061 (1995).
- [2] S. Heike, S. Watanabe, Y. Wada and T. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 3866 (1999).
- [3] S. Heike, S. Watanabe, Y. Wada and T. Hashizume, Phys. Rev. Lett. **81**, 890 (1998).