

表面ナノ構造測定のための電界放射低速電子回折装置の開発

九州大学大学院総合理工学研究院

水野清義

【研究の背景と目的】

集積回路の著しい高密度化や、ナノテクノロジーの推進により、固体表面においてナノメートルオーダーの構造を作成し、その性質を調べる研究が盛んになってきている。その際、微細化が進めば進むほど、その原子配列を明らかにすることが重要となる。原子配列を直接観察する方法として走査トンネル顕微鏡 (STM) が広く使われるようになってきたが、表面第 1 層しか見えないため、2 層以上の複雑な原子配列を調べることは困難である。構造決定には回折法を用いるのが有効である。表面の構造解析には低速電子回折法 (LEED) が広く用いられており、多くの表面構造が決定されてきた。しかし、プローブ電子線の径が大きいため、ナノ構造の解析には使用できなかった。

本研究のねらいは、表面のナノメートルオーダーの構造を解明する手法を開発することである。そのために、走査トンネル顕微鏡探針を電界放射電子銃として用い、表面微小領域 (ナノメートルスケール) からの回折パターンを測定する装置を開発することを目標としている。

【本研究で開発する装置の原理】

本研究では、走査トンネル顕微鏡の探針を電界放射電子銃として使用する。図 1 に探針と試料間のポテンシャルダイアグラムを示す。通常の走査トンネル顕微鏡の動作領域では探針-試料間の距離が 1 nm 程度と小さく、探針から試料へと（あるいはその逆に）電子がトンネルする。しかし、探針-試料間の距離を 10 nm から 100 nm に設定し、探針に 1 V/nm 程度の電界をかけると、図 1 に示したように電子は探針から探針-試料間の真空領域へと電界放射する。この電子をプローブ電子として用いる。

図 2 に探針-試料間の等電位面を計算した結果を示す。探針-試料間距離 100 nm、探針に -30 V の電位をかけた場合である。探針先端に大きな電界が集中するため、電子は探針先端の比較的狭い領域から電界放射する。真空領域へ飛び出した電子は等電位面の最も勾配の大きな経路をたどって、探針-試料間の最短距離の位置へと、あまり広がらずに到達する。図 2 (a) に探針先端から飛び出した電子の軌跡を示す。探針先

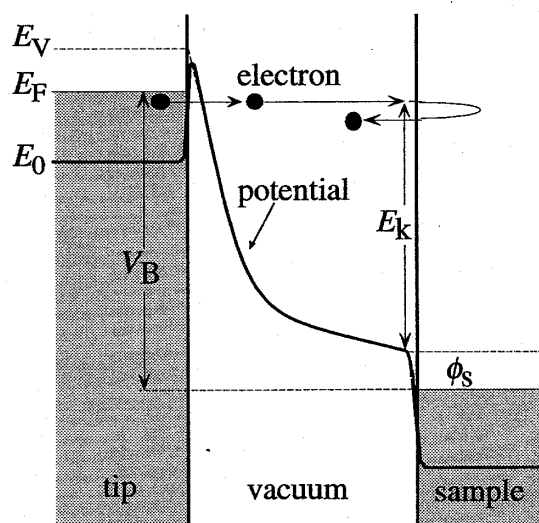


図 1. 探針-試料間のポテンシャルの概念図。

端の形状に依存するが、電解研磨によって得られた先端の鋭い探針の場合、広がり角は 10° 程度であることが電界放出の実験から明らかになっている。したがって、試料表面における電子ビームの半径を 10 nm 以下に制限することが可能である。

一方、試料表面で散乱した電子は探針-試料間の電場によって再び試料側へと引き戻されてしまう。しかし、十分な運動エネルギーを持っていれば、探針-試料間領域の外側の真空中へと飛び出してくるはずである。これを引き込み電極を用いて取り込むことにより測定する。図 1 のポテンシャルダイアグラムより、探針-試料間電位差が 30 V、試料の仕事関数が 5 eV のとき、散乱電子の試料表面での運動エネルギーは 25 eV になることがわかる。図 2 に、試料から運動エネルギー 25 eV の電子が

それぞれの方向へ散乱されたときの軌跡を計算した結果を示す。多くの場合、探針-試料間領域から外へ飛び出してくることがわかる。また、放出角度により軌跡が異なるので、散乱パターンを測定することにより、放出角度を調べることが可能である。

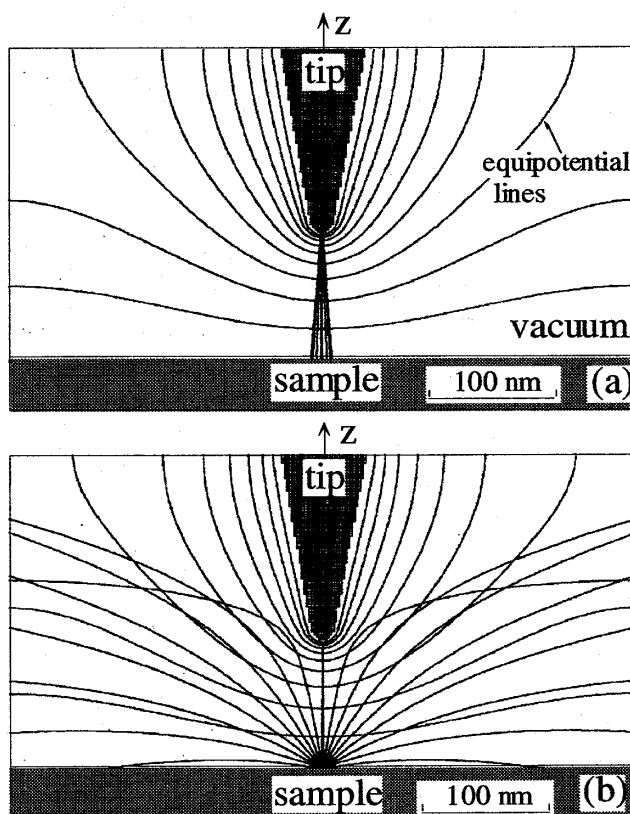


図 2. 探針-試料間の等電位面および
(a) 探針から電界放出した電子の軌跡と、
(b) 試料表面で散乱した電子の軌跡。

【装置】

探針を電界放射モードで動作させ、試料で散乱した電子を検出するための装置を設計・製作した。装置の概略図を図 3 に示す。図の左側が走査トンネル顕微鏡部である。直径 0.5 mm のタングステンワイヤーを電解研磨により先鋭化し、探針として用いた。探針の走査は 4 分割円筒型のピエゾ素

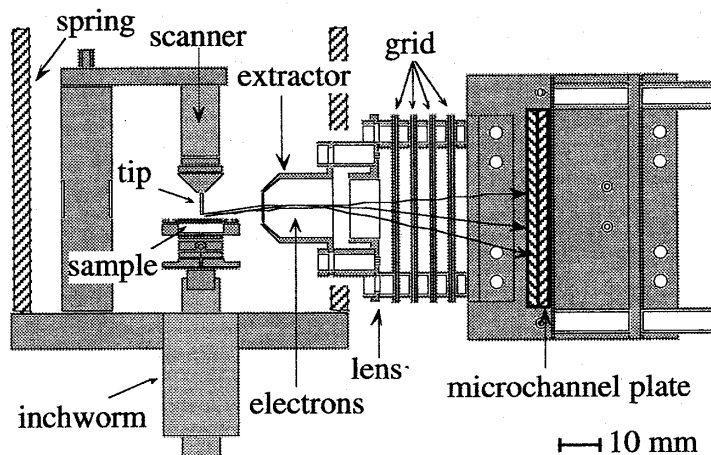


図 3. 装置の概略図。

子で行った。最大 200 V の探針電圧で動作させるため、粗動にインチワームを用いて、表面垂直方向の十分な可動距離を持たせた。

図 3 の右側が散乱電子の検出部である。円筒対称の引き込み電極とレンズの後ろに 4 枚のグリッドによる阻止電位型エネルギーフィルターがあり、その後ろに 2 段のマイクロチャンネルプレートが設置してある。マイクロチャンネルプレートには蛍光スクリーンが付いており、真空チャンバに取り付けられた窓を通して散乱パターンを観察することができる。

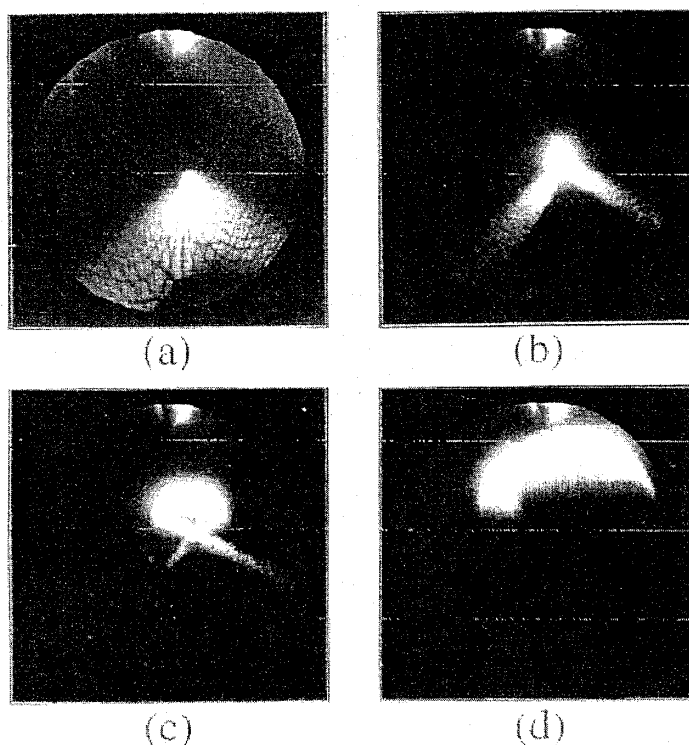


図 4. 散乱パターンのレンズ電位による変化。

【結果と考察】

探針-試料間電位差を 14 V から 30 V に保ち、0.5 nA の電界放出電流一定モードで安定に動作させることができた。電位差 30 V のとき、探針-試料間距離はおよそ 100 nm であった。この条件で、散乱電子の検出実験を行った。その結果得られた散乱パターンの例を図 4 に示す。引き込み電極の電位が +600 V、グリッドの電位が +100 V ~ +200 V であった。散乱パターンの形状はレンズ電極の電位を +20 V, +50 V, +80 V, +100 V と変化させることにより、図 4 (a)~(d) のように変化した。ただし、パターン中のメッシュのような縞模様はグリッドの影である。また、(a)~(d) に共通して映っているスクリーン上部中央のパターンはイオンポンプからのノイズであり、電界放出電流やレンズ電位に依存しない。今のところ、回折スポットであることが確認できるようなパターンの取得には至っていない。

散乱パターンとレンズ電極印可電圧の関係を明らかにするために、電子の軌跡を計算した。3 次元直交座標系において、図 3 の装置図を基に電極等を配置して計算を行った。探針近傍のスケールは電極等の大きさと比べてはるかに小さいため、この部分の形状は適当に近似した。探針に 0 V、試料に +30 V、引き込み電極に +600 V、グリッドに +100 V の電位を与えた。このとき、運動エネルギー 25 eV の電子が、探針正面の試料上の 1 点から等方的に放出されたとして電子の軌跡を計算した。電子がマルチチャンネルプレートに到達したときの、プレート面における座標をプロットした結果を図 5 に示す。レンズ電極の電位を +10 V, +40 V, +70 V, +100 V と変化させることにより、図 5 (a)~(d) のようにパターン形状が変化した。このレンズ電

極印加電位とパターン形状変化の関係は、実験と良く一致している。このことは、実験で得られたパターンが、探針から電界放出した電子が試料表面で散乱された後、引き込まれて検出されたものであることを支持している。

【今後の予定】

今後、鮮明な回折パターンを得るために、試料にシリコン表面を用い、探針先端形状の最適化などを進めていく予定である。また、現在の装置では試料表面平行方向に電子を引き出しているため、得られた散乱パターンの形状が複雑で、解析が困難である。特に、散乱パターンが表面構造の対称性を失っている。そこで、引き込み方法に工夫を施した新しい検出部の製作を進めている。

【謝辞】

本研究は財団法人新世代研究所研究助成費の援助を受けて行いました。新世代研究所の関係者各位に深く御礼申し上げます。

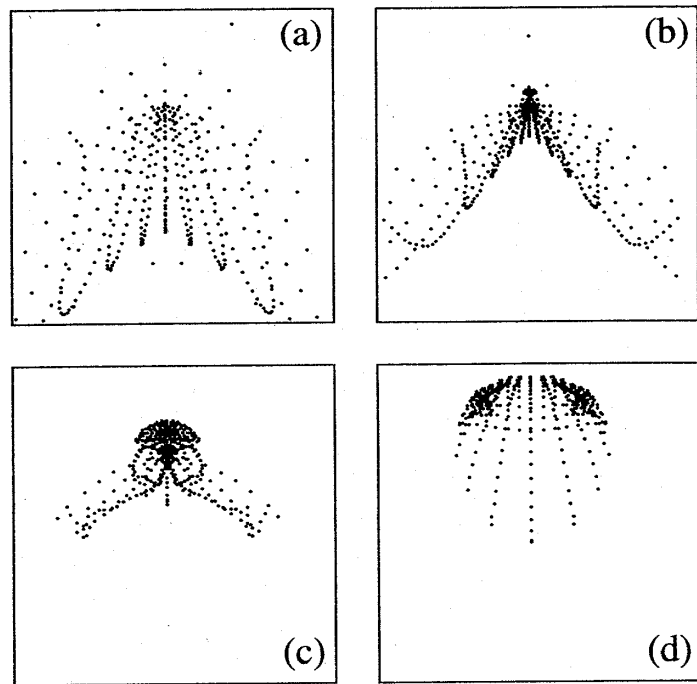


図5. 散乱パターンのレンズ電位による変化の計算結果。