

卒業論文要旨

Pulse SPM を用いた局所仕事関数測定法の開発

システム工学群

極限ナノプロセス研究室 1220161 村田 笑子

1. 研究背景

仕事関数はエレクトロニクスデバイスの性能を左右する物性値であり、正確に計測することがデバイス性能評価の観点から重要となる。特に今日では、微細加工技術の発展に伴い、デバイス構成材料のサイズもナノスケールに至っているため、仕事関数もナノスケールで精密に評価する技術が欠かせない。このような計測は、近年、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy : STM) により実現している。STM では、金属探針を通じて検出されるトンネル電流から原子レベルの仕事関数(Local Barrier height : LBH)を計測できる。しかし、STM による LBH の計測では探針を試料表面に近接させる必要があるため、探針先端の状態が不安定化しやすく再現性のあるデータ取得が難しい。したがって LBH の精密測定には、従来の STM に代わる新たな測定技術の開発が求められる。

そこで本研究では、近年開発されたパルス原子間力顕微鏡 (Pulse AFM)^(1,2)を応用して、導電性カンチレバーの振動特性と超短電圧パルスを組み合わせた LBH 計測手法(Pulse SPM)を開発することを目的とした。Pulse SPM の開発には、既存の SPM システムに超短電圧パルスを精密に制御しながら印可する技術が必要となる。本研究ではそのような超短電圧パルス制御を実現するためのコントローラーを構築し、その動作性能の検証を行った。

2. Pulse SPM の原理

本研究で開発を目指す Pulse SPM 装置の構成を図 1 に示す。装置は AFM と STM の同時測定が可能な AFM/STM 複合装置と超短電圧パルス制御部から構成される。計測では、試料表面に近接して定振幅振動する導電性カンチレバーに同期させながら、超短電圧パルスを、振幅 V_p 、時間幅 ω を制御しながら計測試料に印可する。同期のタイミング(トリガーポイントからの遅延時間 τ)はカンチレバー振動周期内で掃引させ、その際に検出されるトンネル電流 I_t を計測することで $I_t - \tau$ のデータを得る。 $I_t - \tau$ のデータは数値計算により、一般的な STM の計測量である $I_t - z$ (ただし、 z は探針-試料間距離)に変換され、そこから以下の式を通じて LBH ϕ_0 が見積もられる。

$$\phi_0 = \frac{\hbar^2}{8m_e} \left(\frac{d \ln I_t}{dz} \right)^2 + \frac{eV_p}{2} \quad (1)$$

ただし、 \hbar はディラック定数、 m_e は電子質量、 I_t はトンネル電流、 e は電子素量を表す。

3. 研究方法

本研究では、超短電圧パルス制御部を構築するために、任意波形発生器(WX2182C, デイバー社)から出力させる超短電圧パルスを精密制御可能なコントローラーを、LabVIEW を用いて開発した。コントローラーは、その動作チェックを行うために AFM/STM 装置に組込み込み、テスト計測を行った。計

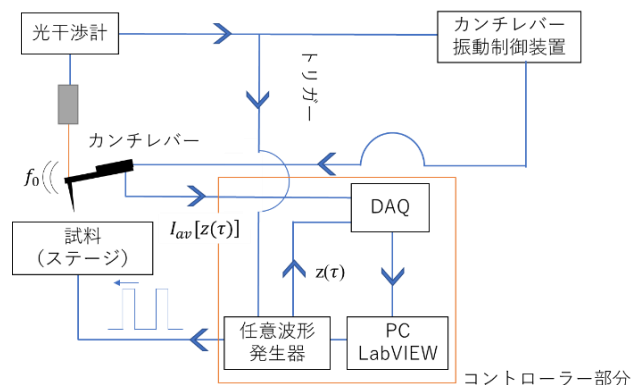


Fig.1 Schematic diagram of pulse-SPM.

測の試料には代表的な半導体表面であり、基礎物性に関する知見が十分に蓄積されている Si(111)-(7x7)表面を採用した。

4. 実験結果

本コントローラーを組み込んだ AFM/STM 装置で得られた $I_t - \tau$ データを図 2 に示す。図からトンネル電流は $\tau = 0$ でピーク(平均は約 10 nA)を持つ対称な曲線であることが確認できる。遅延時間はカンチレバーの振動周期だけ掃引できるため、 $\tau = 0$ では探針が試料表面に最接近したタイミングでパルス電圧を印加した状態に対応し、さらに $\tau < 0$ ($\tau > 0$)の領域では探針が試料表面へ接近している(試料表面から離れている)過程でパルス電圧が印加された状態に対応している。

今回計測された $I_t - \tau$ データ(図2の赤曲線)はSN比が低かったため、LBH の評価では、平滑化処理を施した $I_t - \tau$ (図2の青曲線)に対して解析を行った。図3は、図2の $I_t - \tau$ データを $I_t - z$ データに変換してプロットした結果を示している。図中の赤線、青線はそれぞれ図2の $\tau < 0$ 、 $\tau > 0$ の範囲の $I_t - \tau$ データの変換結果に対応している。図から、 z の増加

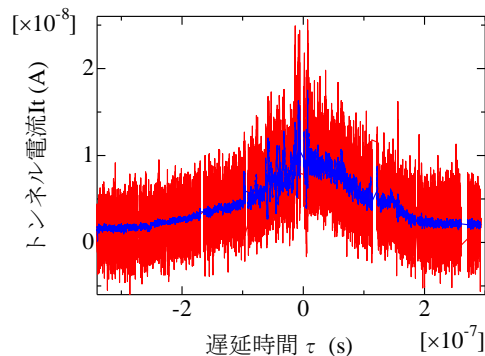


Fig.2 raw data (red) and smooth filtered data (blue) of $I_t - \tau$ curves measured on the Si(111)-(7x7) surface.

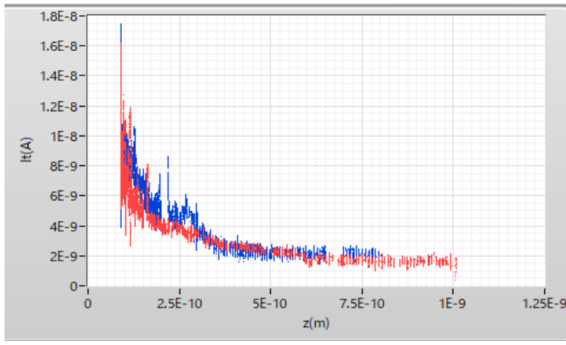


Fig.3 $I_t - z$ curves replotted from the smooth-filtered $I_t - \tau$ data in Fig. 2. Red (Blue) curve corresponds to the $I_t - \tau$ curve in $\tau < 0$ ($\tau < 0$).

に対して I_t が指数関数的に減衰する様子が確認できる。この特徴は、通常の STM で計測される $I_t - z$ データの特徴と同じである。したがって、pulse SPM では STM と同様の LBH の計測が可能であると結論できる。

図 4 は図 3 の I_t を対数にして再プロットした結果を示す。 I_t は z に対して指数関数的依存性を示すため、 $\ln(I_t) - z$ は線形であることが確認できる。解析では、図の赤と青の $\ln(I_t) - z$ 曲線を一次関数でフィッティングして、得られた傾き $d[\ln(I_t)]/dz$ から、式(1)を用いて LBH の評価を行った。その結果、赤と青の $\ln(I_t) - z$ から LBH がそれぞれ 0.131[eV], 0.182[eV] と評価された。これらの値は一般的な Si(111)-(7×7)の仕事関数(~4.6eV)⁽³⁾を大きく下回っている。

5. 考察

図 3 から本研究で開発した Pulse SPM で、通常の STM 計測と同様にトンネル電流の距離依存性を検出可能であると結論できる。一方、計測データから評価した LBH は一般的な Si(111)-(7×7)の仕事関数を大きく下回る結果となった。こ

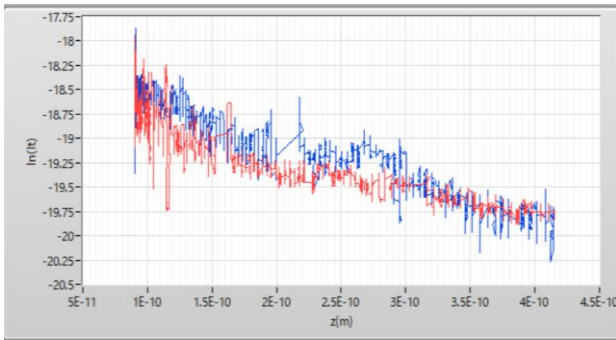


Fig. 4 $\ln(I_t) - z$ curves replotted from Fig. 3. Red (Blue) curve correspond to the $I_t - \tau$ curve in $\tau < 0$ ($\tau < 0$).

のような結果の要因には、第一に測定で設定した超短電圧パルスの振幅が挙げられる。LBH 導出式は、 $V_p \ll \phi_0$ の状況を想定したトンネル確率から導出している。しかしながら、本計測で設定した V_p は 4 V であり、Si(111)-(7×7)の仕事関数(4.6 eV)にほぼ一致している。このような状況では、探針-試料間に流れる電流は、トンネル遷移から電界放出に変化するため、LBH 自体を正確に評価できないと考えられる。第 2 の要因には、パルス電圧印可に伴うカンチレバー振幅変動が挙げられる。本計測では、AFM/STM を定振幅カンチレバー(FM モード)で動作させたが、短時間に 4 V という大電圧が探針試料間に印可されると、両者の間に働く静電気力も瞬間的に増大してしまい、それがカンチレバー振動振幅変動(フィードバックエラー)を引き起こす可能性が考えられる。

6. まとめと今後の展望

本研究では、Pulse SPM を用いた LBH の精密計測を目的として、超短電圧パルス制御コントローラーを開発し、AFM/STM 装置を用いてテスト計測を行った。その結果、Pulse SPM により、一般の STM と同様の $I_t - z$ データを得ることに成功した。一方、LBH の算出では、それが Si(111)-(7×7)の仕事関数を大きく下回ることが明らかとなった。このような結果の要因としては、パルス振幅の大きさ、及びパルス電圧印可中のカンチレバー振動振幅変動について考察を行った。以上の成果を踏まえ、今後の展望を以下にまとめる。

第一に、本計測では、あくまでコントローラーの性能評価が主目的であり、トンネル電流を高感度に検出する必要があったため、 V_p を 4 [V] に設定したが、今後は、本考察に基づき $V_p < 2$ [V] の超短電圧パルスで計測を計画している。

第二に、今回の計測値ではトンネル電流計測含まれるノイズが大きかったため、それを取り除ける条件で計測を行う。具体的には、液体窒素温度の環境で pulse SPM 計測を行うことを計画している。

第三に、LBH 評価値のエラーの要因として考察したパルス印可中のカンチレバー振動振幅変化の可能性を検証する。具体的には、パルス印可中のカンチレバー振動振幅をリアルタイムで直接観察する。

文献

- (1) E. Inami and Y. Sugimoto, Phys. Rev. Lett. 114, 246102 (2015).
- (2) E. Inami and Y. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 08NB05 (2016)
- (3) W. Monch, Semiconductor Surfaces and Interfaces (Springer, Berlin, 1995)