

卒業論文要旨

プローブ励起による半導体表面上での空格子形成

システム工学群

極限ナノプロセス研究室 1200006 浅津 怜司

1 緒言

半導体は、現代のエレクトロニクスの根幹を担う重要なデバイス材料である。デバイスの高性能・多機能化の実現には、回路の高集積化が求められるが、その際、デバイスの微細化は重要な要素である。日々研究され、急速に発展する微細化のサイズは、今や数ナノメートルまで達しつつある。しかしながら、このようなサイズでは量子効果が顕著にあらわれ、巨視的には無視できていた原子レベルの欠陥が動作不良や性能劣化等を引き起こしてしまう。これらの問題の解決には、原子欠陥の発生源、物理的・化学的性質の研究に併せて、それらを機能単位として制御した新しい原理の材料開発が望まれる。

走査トンネル顕微鏡 (STM) は、先端の鋭く尖った金属探針を物質表面に接近させ、その際に探針-試料間に流れる微弱な電流 (トンネル電流) から、表面の原子構造及び局所電子状態に関する情報を得る測定装置である^[1]。この STM は、

- ① 表面の構造を原子レベルで観察できる点、
- ② トンネル電流を表面局所領域への電荷注入 (電子刺激)

に利用して、その構造的応答を“その場観察”できる点、で原子欠陥の発生源やその諸性質を探る上で、非常に強力なツールとなる。

これまで、この STM の特長を生かして、化合物半導体である InP (110)-(1×1) 表面への電荷注入効果の研究がなされてきた^[2]。彼らは、表面へ正孔を注入することで、表面 P および In 原子の原子結合が切断され、表面に空格子が形成されると報告している。しかしながら、彼らは、n タイプドープの試料を中心に議論しており、p タイプまたはドープなしの試料に対しても同一の機構で統一的に説明できるかは明らかにされていない。そこで本研究では、STM により p タイプの InP (110) - (1×1) 完全表面に、電荷を注入した際の影響の検証を目的に、その前段階として、STM 装置の構築・最適化、さらに装置の性能チェックとして、代表的な半導体表面である Si (111)-(7×7) 表面、および研究対象である InP (110)-(1×1) の STM 観察を行った。

2 実験方法

半導体表面は、化学的に活性であるため、STM 観察の際には、超高真空環境で必須である。実験では、まず超高真空環境構築のために、超高真空 STM システム全体を 48 時間加熱処理 (ベーク処理) した。その後、STM 測定の阻害要因である電気/機械ノイズを低減させ、原子分解観察を実現するために、テストサンプルとして大気中劈開で作成したグラファイトの STM 観察を行った。さらに、半導体表面の中でも比較的作成・観察が容易な Si (111)-(7×7) 表面を加熱処理で作成し、STM 観察を行った。最後に、本研究の対象試料である InP (110)-(1×1) 表面を超高真空中で劈開することにより作成し、STM 観察を行った。

3 実験結果と考察

3.1 超高真空システムの構築

本研究では、以下の手順により超高真空環境を実現した。

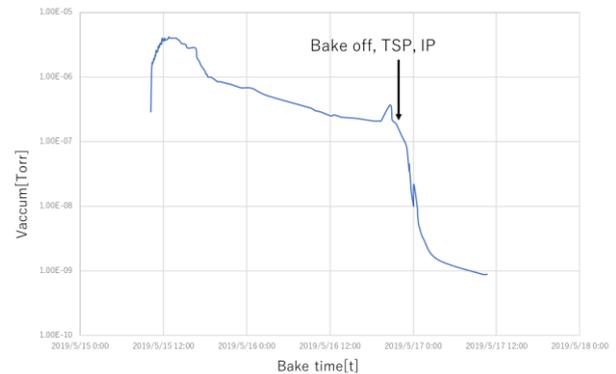


Fig.1 pressure curve as a function of bake-out time

まず、ドライポンプとターボポンプを稼働させ、 $\sim 1.0 \times 10^{-7}$ Torr の真空度を達成した。その後、約 48 時間の加熱処理 (ベーク処理) を行った。ベーク処理時間と真空度の関係を図 1 に示す。開始直後はシステム全体の温度上昇に伴い、真空度が一時的に悪化するが、その後、システムが設定温度に達した後は、真空度が向上しはじめ、ベーク処理開始から 30 時間後には、 $\sim 5.0 \times 10^{-8}$ Torr に到達した。約 40 時間のベーク処理終了後、 $\sim 1.0 \times 10^{-8}$ Torr まで真空度が向上した。その後、イオンポンプとチタンサブリーションポンプ (45A で 1 分間) 稼働させることにより、真空度は $\sim 2.0 \times 10^{-10}$ Torr に到達した。これにより、半導体試料の観察を行うのに十分な超高真空環境を実現できた。

3.2 ノイズの低減

STM は微弱な信号を検出し、アンプにより増幅を行うことで観察を行うため、僅かなノイズであっても影響を受ける。そのため、実験室内の STM 設置箇所での振動を測定した。その結果を図 2 に示す。STM 観察に深刻な影響を及ぼす周波数領域 (<100Hz) に注目すると、20Hz と 60Hz に振動のピークを持つことが確認できる。ノイズの影響や STM の動作確認のため、

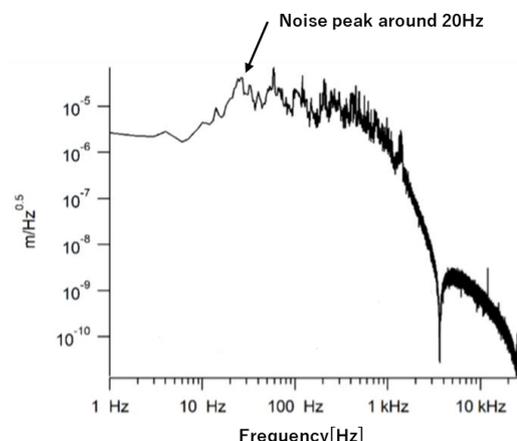


Fig.2 Laboratory floor vibration spectrum

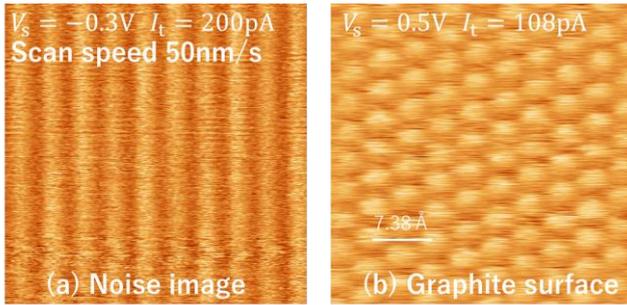


Fig. 3 STM images of graphite surface acquired before, (a), and after, (b), installation of anti-vibration rubber

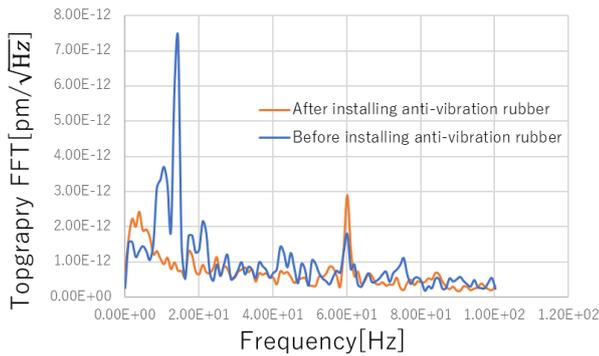


Fig. 4 Noise spectrum acquired before (blue) and after (red) installation of anti-vibration rubber.

グラファイトのSTM観察を行った。グラファイトは、代表的なSTMテストサンプルとして広く利用されている。観察して得られたSTM像を図3(a)に示す。イメージングでは、スキャンサイズを4nm×4nm、1ライン当たり0.6秒のスキャン時間に設定した。図3(a)には10本の周期的な線が確認される。スキャン時間と線の本数より、これは約20Hzのノイズの影響だと考えられる。そこでSTM装置でノイズを計測したところ、20Hz付近に大きなピークをもつノイズが計測された(図4(青線)参照)。図2においても、20Hz付近に振動のピークを有することから、このノイズは実験室の床振動に起因していると考えられる。そこで、床振動による機械的ノイズを低減させるため、装置架台と床の間に除振ゴムを設置した。図4(赤線)に除振ゴム設置後に、計測したノイズスペクトルを示す。除振ゴム設置前のノイズと比較した結果、20Hz付近のノイズだけでなく全体的なノイズレベルも低減させることができた。ノイズの減衰後、再度グラファイトの測定を行った。図3(b)に測定したSTM像を示す。これは輝点が周期的に配列しており、特有の三角格子構造[3]を形成していることから、グラファイト表面であることが明らかとなった。以上、機械的ノイズの除去により、本STM装置本来のパフォーマンスを得られたことが確認できた。

3.3 Si(111)-(7×7)表面の観察

Si(111)-(7×7)表面作成のため、真空度を 5.0×10^{-10} Torr以下に保ちながら、Si(111)試料の加熱処理を行った。作成したSi(111)-(7×7)表面をSTM観察すると、図5のような12個の輝点と4個のコーナーホールが確認できた。これはSi(111)-(7×7)表面特有の構造であるため、本STMでSi(111)-(7×7)表面の作成及び観察に成功した。

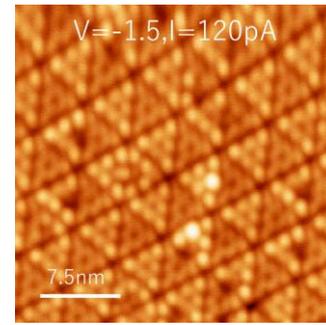


Fig. 5 STM image of Si(111)-(7×7) surface

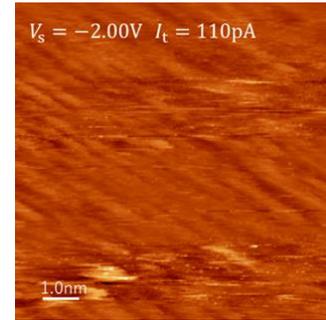


Fig. 6 STM image of InP(110)-(1×1) surface

3.4 InP(110)-(1×1)表面の観察

InP(110)を劈開して得られたInP(110)-(1×1)表面のSTM像を図6に示す。原子鎖は確認できたが、輝点は確認できず原子分解能は得られなかった。図6の像は、左下から右上に像が伸びて歪んでしまっている。その原因として、熱によるドリフトが考えられる。

4 今後の研究計画

本研究の結果として、半導体試料の観察を行うのに十分な超高真空($\sim 2.0 \times 10^{-10}$ Torr)環境の作成に成功した。またノイズの低減化により、グラファイト、及びSi(111)-(7×7)の原子分解能観察にも成功した。InP(110)-(1×1)表面については、原子構造を反映させるSTM像は観察できたが、原子分解は得ることができなかった。原因としては、熱ドリフトによるSTM像の歪みが考えられる。よって、STM装置を断熱材で囲う等の対策を講じ、測定時の温度の平均化を行っていく。また、InP(110)-(1×1)表面の原子分解能観察が成功したのち、探針からの局所的な電子注入を行い、その構造的応答のその場観察を行っていく。

参考文献

- [1] C. Julian Chen, Introduction to Scanning Tunneling Microscopy Second Edition.
- [2] J. Tsuruta, E. Inami, J. Kanasaki, K. Tanimura, Surf. Sci. 626 (2014) 49.
- [3] Sang-Il Park and C. F. Quate, Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 112.