

卒業論文要旨

超高真空下における表面清浄化の自動制御システム開発

システム工学群

極限ナノプロセス研究室 1230102 俵坂 修真

1. 研究背景

近年、微細加工・高密度集積技術の進展に伴い、デバイスの舞台である表面の構造や物性を原子レベルで制御（極限微細加工）することの重要性が高まっている。一般に、表面は温度や圧力（雰囲気）等の外的環境により、その構造や性質が敏感に変化する。そのため、原子レベルで規定された表面を作製するには、超高真空下で残留ガス分子をモニターしながら、イオンスパッタ・試料加熱を行う。しかし、今日、このような長時間にわたる表面処理の工程は、その大半を人が担っているため、そこでは、しばしばヒューマンエラーが生じ、また最終的に得られる表面の再現性低下が問題になる場合がある。この問題を解決するには、表面に影響を及ぼす複数の相関するパラメーターを一元的かつ正確にモニターしたうえで、規定の処理を自動的に行うシステムが求められる。

そこで本研究では、通電加熱による清浄表面の作製にフォーカスし、直流電源の電圧・電流値の自動制御による原子レベルで平坦かつ清浄な表面作製システムの開発を目的とした。具体的には、自動制御の第一歩として LabVIEW を用いて試料温度・超高真空システムの真空度をモニターしながら直流電源の出力制御を行うプログラムを構築し、そのシステムの動作検証を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

本システムでは、試料作製環境をモニターするために、試料温度を測定用の放射温度計（ジャパセンサー社、FLHX0300/TMCX-NLN）、真空度を計測するための熱陰極型電離真空計および真空ゲージ（Varian_Agilent Technologies, XGS-600）を用いた。さらに、試料の通電加熱には、直流安定化電源（ZX-S-400LAN、高砂製作所、以下、直流電源と呼ぶ）を用いた。また、PC で温度・真空度のモニターと電圧・電圧制御のプログラム開発環境には、LabVIEW (National Instruments 社) を用いた。LabVIEW はプログラムを記述するブロックダイアグラムと、計測や制御を行うことが可能なフロントパネルの 2 つのウィンドウを使用してコントローラ構築を行うアプリケーションである。温度・真空度の信号収集 (PC への取り込み) には、DAQ デバイス (National Instruments, USB6001) を用いた。一方、直流電源のモニター・制御は、PC と直流電源を LAN ケーブルで接続して行った。本システム評価用の試料には、Si(111)-(7×7)表面^(1,2)を選定した。以上の実験機器及び試料でもって構築した本システムの装置構成を図 1 に示す。

2.2 構築システムの性能評価方法

構築したコントローラの動作をテストするため、大気中でシリコンの加熱を行い、LabVIEW で温度・直流電源の出力電流・電圧値をリアルタイムでモニターした。直流電源の出力は、3 つの条件で行った。検証 1 では、まず直流電源の電流出力をユーザーが指定した通りに定電流モードで出力可能か検証した。検証 2,3 では、それぞれ Si(111)-(7×7)の清浄

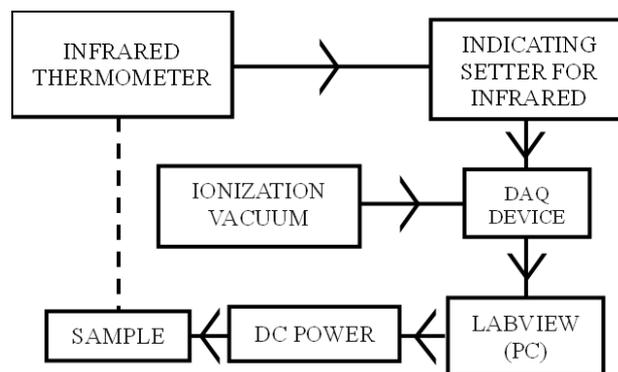


Fig.1 Block diagram of the clean surface preparation system

化プロセスに必要なフラッシング（瞬間的に高温に加熱するプロセス）と長時間にわたる冷却工程を正常に行えるか検証した。本検証は大気中で行うため、超高真空中でしか使用できない電離真空計からの信号は、任意波形発生器 (HEWLETT PACKARD 社, 33120A) からのアナログ信号で代用した。動作検証後、構築したシステムは超高真空走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy: STM) に組み込み、Si(111)-(7×7) 清浄表面の作製をした。作製した表面の清浄度は STM 観察により評価した。

3. 大気中での動作検証結果

図 2 は、検証 1 でモニターした直流電源の出力電流・電圧試料温度の時間変化を示している。図より、出力電流を変化させた際に、定電流モードによる出力電圧の変化と試料表面温度の変化をリアルタイムでモニターしていることが確認できた。

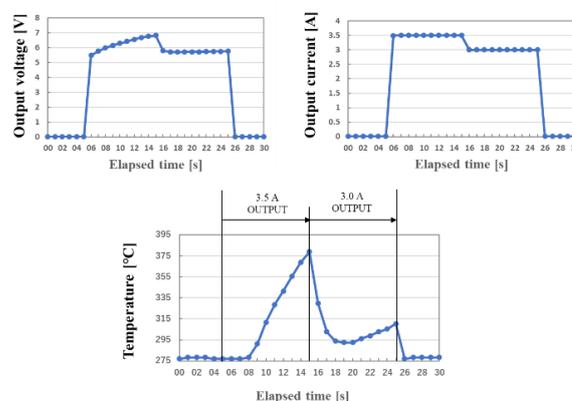


Fig.2 Time-dependent voltage, current, and sample temperature monitored by the clean surface preparation system in the performance test 1.

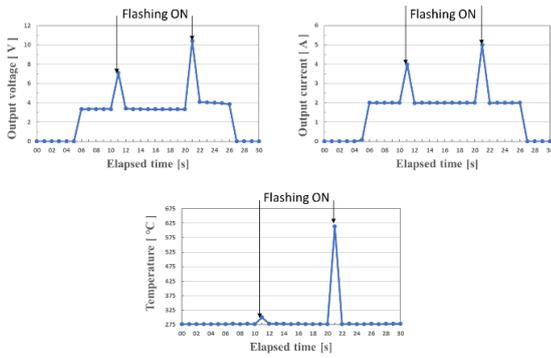


Fig.3 Time-dependent voltage, current, and sample temperature monitored by the clean surface preparation system in the performance test 2.

図3は検証2でモニターした直流電源の出力電流・電圧・試料温度の時間変化を示している。計測開始から10秒後と20秒後に電流が設定値(10秒後:4A, 20秒後:5A)で1秒間保持され、試料が瞬間的に昇温・降温する様子が確認できる。本結果から試料のフラッシングを正常に行えることが検証できた。

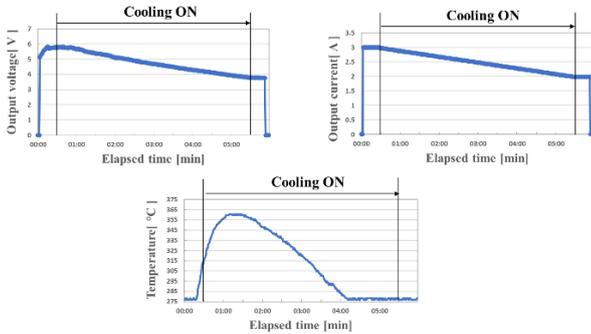


Fig.4 Time-dependent voltage, current, and sample temperature monitored by the clean surface preparation system in the performance test 3.

図4は、検証3でモニターした直流電源の出力電流・電圧・試料温度の時間変化を示している。図から計測開始から30秒間は電流を3Aに保持させ、その後、5分間にわたって2Aまで低下する様子が確認できる。また電流値に対応して試料温度が緩やかに降温するようすが確認できる。本結果から試料の長時間に渡るクーリング工程を正常に行えることが検証できた。

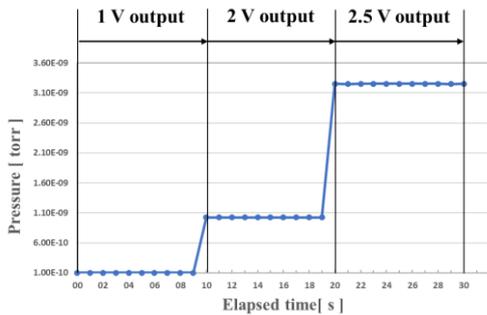


Fig.5 Time-dependent signal imitating pressure measured by the clean surface preparation system.

図5は本装置を用いた真空度モニターの動作チェック結果を示している。任意波形発生器からの出力電圧値に対応して疑似真空度が正常にもモニターできることが検証できた。

以上の検証より、本コントローラーで試料温度と真空度および直流電源の電流・電圧値のモニター、さらに通電加熱工程で重要なフラッシングとクーリングを正常に行えることが検証できた。

4. 本コントローラーによるSi(111)-(7×7)清浄表面取得

図6(A)は、構築したコントローラーを用いて清浄化処理を行ったSi(111)-(7×7)表面のSTM像を示している。比較のため、図6(b)には、本コントローラーを用いず(マニュアル制御)で表面清浄化を行ったSi(111)-(7×7)表面のSTM像を示す。図より、双方の表面上で、局所的な明点・暗点が散在しているものの、共に、原子レベルで平坦なテラス上に(7×7)単位格子が周期的に形成されている様子を確認できる。

5. 考察

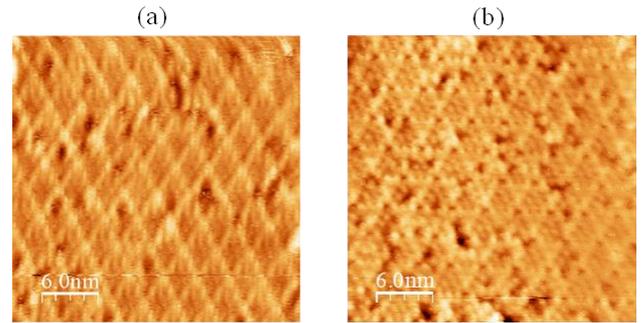


Fig.6 UHV-STM images of Si(111)-(7×7) surface prepared with, (a), and without, (b), the clean surface preparation system.

図6(a)と(b)のSTM像では、双方とも原子分解能で表面を観察できなかった。特に本システムで作製した表面では、(7×7)単位格子内の原子は確認できなかった。しかしながら、これらの原因は、本コントローラー導入によるものではなく、評価に用いたSTM側にある。STMで原子分解能観察を実現するには、探針先端を原子レベルで清浄かつ、原子1個分まで鋭化されている必要がある。しかしながら、一般に、探針先端の状態は変化しやすいため、上記の状態に長時間安定に保つことは難しい。特に探針の状態変化は、室温環境では顕著に現れ、原子分解能観察を阻害する。

一方、図6(a)と(b)では、一部に暗点や明点が確認された。これらは、試料清浄化中または清浄化後に表面に吸着した不純物、またはSiアダトムの脱離により形成される空格子欠陥に由来する。しかしながら、このような吸着子や空格子の発生は、本コントローラーの導入によるものでなく、真空チャンバー内の雰囲気の原因である。

以上、構築したシステムは、超高真空システムへの導入による問題を発生させることなく、マニュアル制御と同等の試料表面清浄化を行えると結論できる。

6. 今後の展望

今後の展望として、直流電源自身が出力電流値を試料温度と真空度でもって、フィードバック制御を行うことによる自動制御システムの確立が挙げられる。このことにより、試料温度や真空度の変化に対して早急に対応可能となり、また、他の清浄システム(イオンスパッタリング、蒸着)と併用することによって再現性のよい清浄表面の取得が期待できる。

参考文献

- (1) John E. Northrup, Phys. Rev. Lett, 7 July(1986)
- (2) Winfried Mönch, Semiconductor Surfaces and Interfaces, February(1993)