

卒業論文要旨

超高真空試料処理システムへの温度制御機構の実装

システム工学群

極限ナノプロセス研究室 1240114 中平 青李

1. 研究背景

近年、微細化技術と共に、ナノデバイスが目覚ましい発展を遂げている。ナノデバイスの進歩には試料表面を適切に観察することが重要となる。しかし、試料表面は温度や圧力(雰囲気)などの外的環境によってその構造や特性が容易に変化する。そのため、原子レベルで規定された表面の作製には、超高真空環境下の雰囲気をモニターしながら、正確かつ適切に清浄化や平坦化などの試料処理を行わなくてはならない。しかし、これらの処理工程は大半を人が担っており、どれも長時間にわたる。その結果しばしばミスが起こり、得られる表面の再現性低下が問題となる。この問題の解決には、表面に影響を及ぼすパラメータをモニターしたうえで規定の処理を正確に行う自動システムが求められる。

そこで本研究では、様々な試料処理工程から広く知見が得られている通電加熱による清浄表面作製にフォーカスし、温度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。現在、本研究室では試料温度・真空度・直流電源といったパラメータの一括モニターと、直流電源の出力制御により、表面清浄化を実現しているが、このシステムでは、清浄化において重要な数値である試料温度は電流値を手動で制御している。よって、このシステムに温度制御機構を組み込むことを本研究の目標とする。目標達成にあたって、①温度制御システムの構築、②大気中で構築したシステムの動作検証と適切なパラメータの選定を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

本システムの動作検証として、試料作製環境をモニターするために、試料温度を放射温度計(ジャパンセンサー社, FLHX0300/TMCX-NLN), 真空度を模した疑似信号を発生させる任意波形発生装置、試料の通電加熱用に直流安定化電源(ZX-S-400LAN, 高砂製作所, 以下、直流電源と呼ぶ)を用いた。また、電流・電圧の制御には 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、計測や制御を行うフロントパネルの二つのウィンドウを使用してコントローラー構築を行うアプリケーションである。温度・真空度の信号収集には、DAQ デバイス(National Instruments, USB6001)を用いて行い、PC へ取り込んだ。直流電源のモニター・制御は LAN ケーブルを用いて PC と接続し行った。PC 上では温度・真空度・電流・経過時間をモニターできる。評価用の試料には、Si(111)-(7×7)表面を選定した。以上の使用機器、試料でもって構築した本システムの実験装置構成の概要を図 1 に示す。

2.2 構築システムの性能評価方法

構築したシステムの性能を評価するため、大気中で試料を通電加熱しながら温度制御を行った。用いたシステムは、一

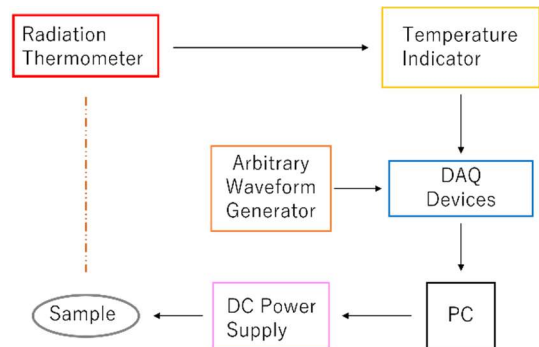


Fig.1 Block diagram of the experimental setup.

定時間で電流値を一定量だけ変化させるシステム(システム 1), PID を用いて電流値を変化させるシステム(システム 2), システム 1・2 を組み合わせて最適化したシステム 3 の 3 つである。システム 1 の検証では、電流変化量 I_T と電流を変化させるスパン S を様々に変え、それぞれのパラメータでの応答性と安定性を調べた。システム 2 ではまず比例項だけで動作させ必要な項を選定し(検証 1), その後、比例項と微分項の最適化を行った(検証 2, 3)。システム 3 ではシステム 1・2 で算出した応答性・安定性を元に最適化したプログラムを作成し、選定したパラメータで評価を行った。最後に、実際の試料処理工程を想定した手順(フラッシング・クーリング)で動作検証を行った。応答性、安定性を評価する指標として、目標温度 T_{SET} に向かって電流を操作し始めてから T_{SET} に到達するまでの時間 $\tau[s]$, T_{SET} と測定温度 T の最大温度差 $\Delta T[^\circ C]$, すべての温度差の二乗平均平方根 $R[^\circ C]$ を算出した。

3. 大気中での実験結果

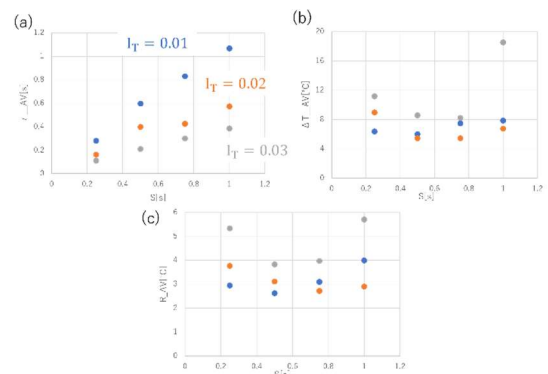


Fig.2 Response time τ_{AV} , (a), Maximum error of temperature from the setpoint, ΔT_{AV} , (b) RMSE R_{AV} , (c), as a function of Span S (see text).

図2はシステム1での各パラメーターにおける各指標のグラフであり、図3は横軸 ΔT_{AV} 、縦軸 R_{AV} の安定性を示したグラフである。図3では左下にあるデータ程安定性が高い。システム1で最も応答性が良かったものは $I_T=0.03A$ 、 $S=0.25s$ であった。一方、安定性が高かったものは $I_T=0.01A$ 、 $S=0.5s$ もしくは $I_T=0.02A$ 、 $S=0.75s$ であった。温度制御という観点では応答性より安定性がより重要視されるため、システム1での最適パラメーターは $I_T=0.01A$ 、 $S=0.5s$ もしくは $I_T=0.02A$ 、 $S=0.75s$ である。

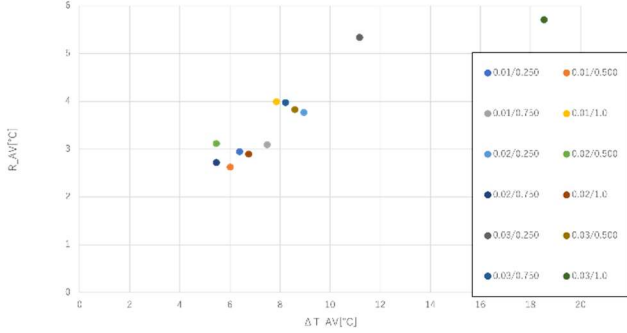


Fig.3 R_{AV} , as a function of Maximum error of temperature from the setpoint, ΔT_{AV} , (see text).

図4に検証1の結果を示す。比例項だけで動作させた際、問題となるのは振動のみであったため、本研究ではPD制御を行った。図5に検証2の結果を示す。比例項は値が小さくなるほど安定性が向上するが、微分項とシステムの応答性・安定性には明確な関係は確認できなかった。図より、システム2の最適なパラメーターは、 $P=0.001$ であり、 $D=0.005$ 、 0.025 、 0.03 のいずれかである。

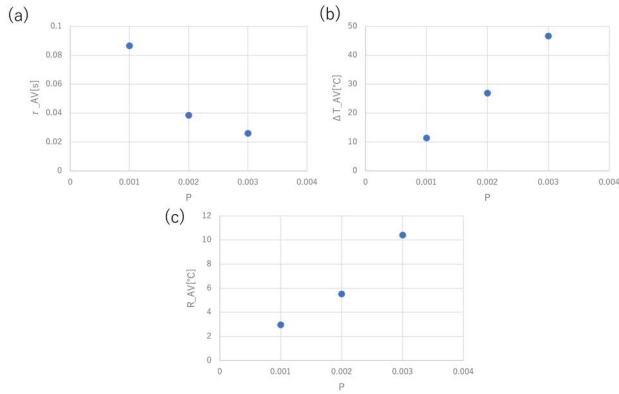


Fig.4 Response time τ_{AV} , (a), Maximum error of temperature from the setpoint, ΔT_{AV} , (b), RMSE R_{AV} , (c), as a function of proportional gain P.

図6はシステム3の結果である。目標温度で保つこととゆっくりと時間をかけて温度変化をさせること(クーリング)が出来ている。一方、瞬間的に温度を上昇させることは可能だが、目標の温度には到達していない。フラッシングに適したパラメーターの選定が課題である。

4. 今後の展望

今後の展望として、フラッシング工程に適したシステムへの改良・パラメーターの選定が挙げられる。また、本研究で構築したシステムを実際に超高真空へ導入し、マニュアルで

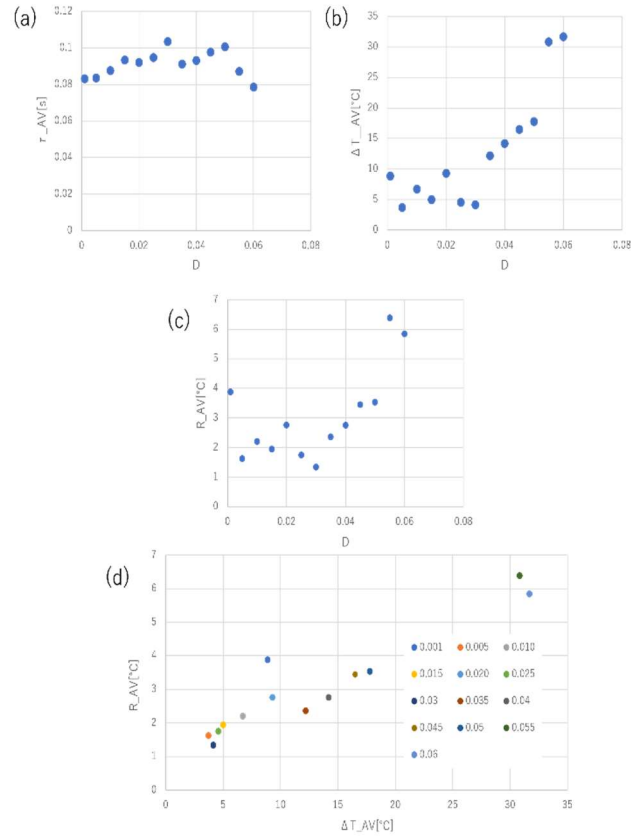


Fig.5 Response time τ_{AV} , (a), Maximum error of temperature from the setpoint, ΔT_{AV} , (b), RMSE R_{AV} , (c), as a function of differential gain D. (d) R_{AV} as a function of ΔT_{AV} .

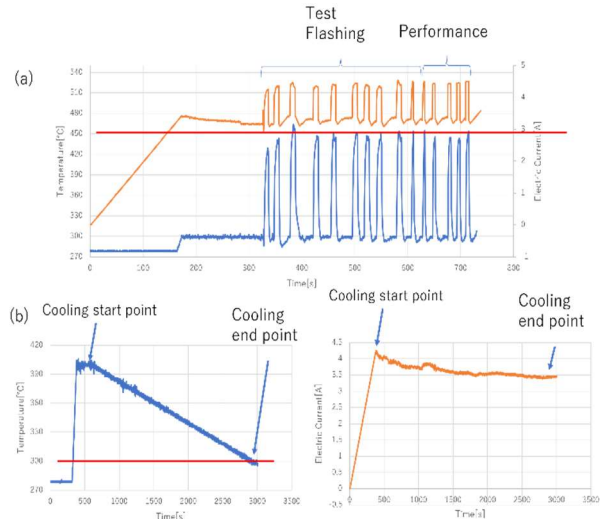


Fig.6 (a) Temperature (blue) and electric current (orange) during flushing procedure. (b) Temperature (blue) and electric current (orange) as a function of time. Orange line in left graph indicates setpoint.

試料処理を行った時の表面と比べ、システムを評価する。さらに、今回は通電加熱のみだが、他の清浄システム(イオンスパッタリング・分子蒸着)と併用することにより再現性の良い表面を取得することが期待できる。