

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656092

研究課題名(和文)原子レベルで平坦な表面を達成する大面積基板対応プラズマ研磨プロセスの検証

研究課題名(英文)Surface treatment process using photoemission-assisted plasma for achievement of atomic scale flattened surface

研究代表者

高桑 雄二 (Yuji, Takakuwa)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：20154768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：原子スケールで平坦な大面積金属基板表面を達成するため、光電子制御プラズマイオン源を用いたドライ研磨プロセスの開発を行った。本研究では金属表面に衝突するイオンエネルギーのラングミュアプローブで計測し、バイアス電圧によってそのエネルギーを0.1 eVから30 eVまで制御することができた。30 eV以下の低エネルギーイオン照射では、初期粗さ13 nmのCu表面の粗さを70%低減することができた。しかしながら、さらにイオン照射を続けると表面に突起が生成され、粗さが増加した。このことから金属表面の平坦化には、照射するイオンのエネルギーだけでなく照射量も重要なパラメータであることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Photoemission-assisted plasma (PAP) ion source has been developed for flattening surface morphology of metal substrates down to an atomic-scale roughness. In this study, ion kinetic energy (E_k) of impinging on surface was estimated by Langmuir probe measurement, resulting in E_k of PAP with 0.1 -30 eV. PAP irradiations to Cu-deposited Si substrates with $Ra(0)$ of ~13 nm were conducted in low energy (< 30 eV) and changing ion fluence (< 10^{18} cm⁻²) regime. From the surface analysis by atomic force microscopy, surface roughness were reduced down to 15-70% compared of $Ra(0)$. However, protrusions formed on the surfaces due to high ion fluence irradiation, which caused increase of surface roughness. The experiment conditions that control the surface morphology changes are revealed from the aspect from ion energy and ion fluence. Based on the observations, it is considered that surface migration enhancement of surface atoms induced by low E_k of PAP plays a vital role for the morphology changes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：光電子制御プラズマ ラングミュアプローブ 表面平坦化 ドライ研磨

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスは微細化の歴史を辿って進化し、寸法、トランジスタ、メモリの集積を始め、高集積度が可能なLSIの3次元積層集積化が進化する一方、下地Si基板表面が荒れていた場合はパスの短い部分で絶縁破壊が生じてしまう。平坦化処理により、基板表面のトランジスタ密度を増やして高集積化した中でもゲート絶縁膜の絶縁破壊電界強度が維持されるということが報告されている[1]。また、電子デバイスだけでなく、光学、医療などの分野にも原子レベルの表面平坦化性が要求されている。

これまでに多用されるようになった化学研磨 (Chemical Mechanical Polishing: CMP) 技術はウェットプロセスであるため、処理後も表面に自然酸化膜が残留してしまい、更に、CuやAuといった柔らかい金属表面では原子スケールでの平坦面を作製するのが困難になることから、放電加工、イオンビームなどのエネルギービームを用いるドライ加工法の使用が拡大している。現在日本国内におけるドライ研磨技術としては、京都大学松尾グループで用いられているガスクラスタイオンビーム (Gas Cluster Ion Beam: GCIB) 及び京都大学須賀研究室でMEMSのための表面活性化接合に用いられている高速原子ビーム (Fast Atom Beam: FAB) が報告されている。GCIBは低エネルギービームで基板にほぼ損傷を与えないが[2]、加工装置が大型で、且つ処理面積が小さく加工時間が長いという問題がある。一方、FABはドライエッチングには有用であるが、ビームエネルギーが高く、照射時間の増加とともに表面粗さが増していくことが報告されている[3]。

精密加工分野での大面積表面の超平坦化要求に応えるため、本申請者らが光電子制御プラズマ (Photoemission-assisted plasma: PAP) イオンソース[4]の超精密機械加工分野への応用を目指して開発を進めてきた。

2. 研究の目的

次世代工学における原子レベルの平坦化を実現するため、本研究は新たなドライ研磨技術として、PAPによる超平坦化面の実現を取り入れることを提唱した。金属表面粗さの低減及びPAPイオンソースを用いた

研磨理論を構築することで、この研究の目的を達成する。

3. 研究の方法

通常の直流放電では基板全体に均一な放電プラズマを形成することができないという問題がある。本研究では、図1に示したように光電子制御プラズマは基板への紫外線照射によって光電子を放出させ、その光電子を用いて紫外線照射領域全体に直流放電プラズマを発生させる。そして、プラズマ中のイオンが基板へ衝突して表面の清浄と平坦化ができると期待される。

前述の通り、本研究の目的を達成するためには、以下の課題について詳細な研究を行う。

希ガスをを用いて光電子制御プラズマの生成、放電特性の評価。

プラズマの特性を調べるため、ラングミュアプローブを用いてプラズマパラメータの測定を行う。

プラズマによる研磨では、基板表面に衝突するイオンの運動エネルギーが重要な要素となるため、イオンエネルギー分析器を取り付ける。この分析器を用いて基板へ衝突するイオンエネルギーを測定する。

Cu、Au及び機械研磨した金属表面のプラズマ処理を行い、処理後の表面はレーザー顕微鏡及び原子力顕微鏡 (AFM) を用いて表面粗さの評価を行う。

前述の実験結果を総括し、効率的な研磨を行うため、各々の材料の効率的な研磨に適した希ガスイオン種及

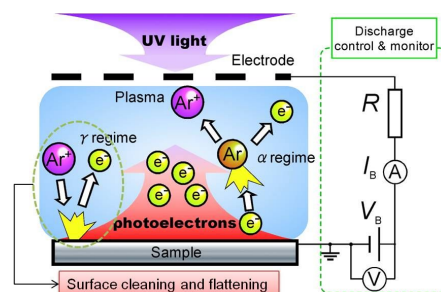


図1 本申請者らによって開発された光電子制御直流放電プラズマの模式図。Ar⁺イオン衝突による基板表面の清浄化、平坦化を達成する。

びそのエネルギーを探索する。ドライ研磨プロセス開発のための基礎知見とする。

以上で得られた知見に基づき、光電子制御プラズマの平坦化へのモデルを作成する。各種材料表面における処理効果を定性的な評価を行う。最終的には光電子制御プラズマイオンソースによるドライ研磨プロセスを確立する。

4. 研究成果

平行な電極間で火花放電を生じる電圧はガス圧と電極の間隔の積の関数である。図2に示したように、光電子制御プラズマの火花放電電圧は通常の直流放電の場合と比べて明らかに減少していることが示している。それは紫外線照射による基板から放出させた $\sim 10^{12}$ photoelectrons/cm²/s の光電子が放電のトリガーとなり、大面積で且つ均

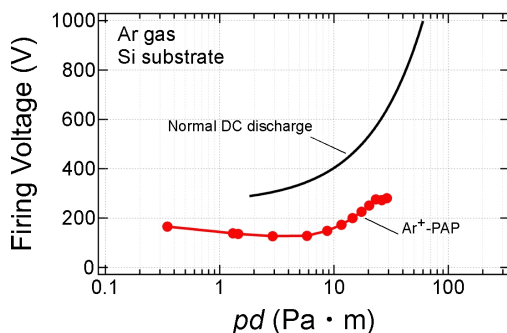


図2 光電子制御プラズマの放電開始電圧が通常直流放電と比べて大幅低下させたことを示している。

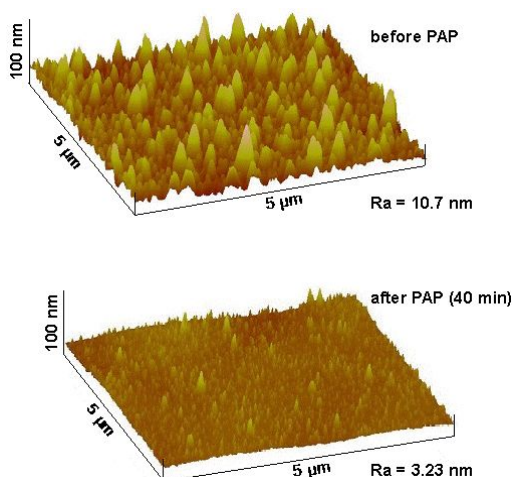


図3 光電子制御プラズマ処理前後のSi裏面蒸着Cu基板表面形状及び荒さRaの変化。

一の直流放電プラズマがより低電圧で発生させることを示している。各々の基板における表面平坦化に最適なイオン種を探索するため、Arガスのみならず、He, Kr, Xeなどの希ガスの光電子制御プラズマの放電特性も調べた。

また、既存のドライ研磨プロセスから、表面へ衝突するイオンエネルギーが研磨対象基板の表面形態へ大きな影響を与えることが分かった。そのため、ラングミュアプローブ法を用いてPAPの空間電位と電子温度などの平坦化への応用となる指標の測定を行った。そして得られたイオンエネルギーと過去の文献において報告されているイオンエネルギーと物質表面との相互作用[5]と比較することで、光電子制御プラズマイオンソースは低エネルギーのイオンを有することを確認し、光電子制御プラズマイオンソースは平坦化プロセスには有用であることを報告している。

前述の通り、低イオンエネルギーを有するPAPイオンソースを用い、現在までにSi基板、Siウェハー裏面にスパッタされたCu及びAu薄膜基板(Cu(200 nm)/Si_R, Au(200 nm)/Ti(100 nm)/Si_R)などにおける平坦化処理を行った。各基板における平坦化処理の結果、算術平均粗さ(Ra)が15~70%の減少が得られた。Cu(200 nm)/Si_R基板においてPAPによる40分処理した結果、Raが10.7 nmから3.23 nmまで69.8%の減少を示している(図3)。

以上より、光電子制御プラズマは金属の超平坦化面の作成に有用であることが分かった。また、これまでの結果を踏まえ、各々の基板における効率的な処理効果を定性的な評価が必要となっている。

参考文献

- [1] 大見俊一郎: 電子情報通信学会「知識ベース」(2010).
- [2] I. Yamada, J. Mastuo, N. Toyoda, and A. Kirkpatrick: Materials Science and Engineering R **34** (2001) 231.
- [3] H. Takagi, R. Maeda, T. R. Chung, N. Hosoda and T. Suga: Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 4197.
- [4] Y. Takakuwa, Japan Patent No. 3932181 (2007).

[5] V.N.Popok, Materials Science and Engineering R **72** (2011) 137.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

S. Ajia, Y. Ohtomo, S. Ogawa, and Y. Takakuwa, "Protrusion Formations on Cu and Si Surfaces by Irradiation of Photoemission-Assisted Ar Plasma" 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2013 年 11 月 8 日、つくば市、つくば国際会議場

S. Ajia, Y. Ohtomo, S. Ogawa and Y. Takakuwa, "Langmuir-probe analysis of photoemission-assisted Ar plasma for planarization process", 2013 年 9 月 12 日、パリ、フランス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

高桑 雄二 (TAKAKUWA, YUJI)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号 : 20154768

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小川 修一 (OGAWA, SHUICHI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号 : 00579203