

科学研究費補助金（学術創成研究費）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成18年度採択分

平成21年 4月16日現在

研究課題名（和文）レーザー補助広角3次元アトムプローブの開発と
実デバイスの3次元原子レベル解析
研究課題名（英文）Development of laser-assisted wide angle three-
dimensional atom probe and its application to atomic level
characterization of true electronic devices
研究代表者 尾張 真則（OWARI Masanori）
東京大学・環境安全研究センター・教授



推薦の観点：社会・経済の発展の基盤を形成する先見性・創造性に富む研究

研究の概要：年々微細化する電子デバイスの製造・評価を支える微小部分分析技術として、適用可能な試料の材質と形状・大きさの制約を克服するレーザー補助広角3次元アトムプローブの開発を行う。

研究分野：複合新領域
科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学
キーワード：ナノ構造化学，表面・界面ナノ構造

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスは高度情報化社会を根底で支えているきわめて重要なハードウェアであり、その集積化は目覚ましい速さで進んでいる。現在デバイスを構成する材料の加工寸法はすでに μm を優に下回っており、その製造・評価を支える微小部分分析技術としてこれまで用いられてきたマイクロビーム分析法はその限界的性能を要求されている。2010年代にはひとつのFETが数10nmの大きさにまで微細化されると予想され、電気的特性を支配するドーパントの位置や濃度を特定する3次元原子レベル解析手法の開発が急務である。

2. 研究の目的

本研究は、原子1個1個の検出、その原子の種類と同定、その原子が試料の中で占めていた3次元原子位置の特定が可能な3次元アトムプローブ(3DAP)法について、適用可能な試料の材質と形状・大きさの制約を克服することにより、今後10年以内に電子デバイスの特定微小部位の解析に必要な定量的3次元元素イメージングを実現しようとするものである。この目的のためにはいくつかの問題点を解決する必要がある。主な問題点は、3DAPは金属または導電性の高い針状試料に対してのみ適用可能であること、分析可能範囲が極端に狭いこと、試料破壊が頻発すること、金属以外の試料からは多原子クラスターイオンが発生することである。また、デバ

イス中の狙った特定部位の分析を目的とするため、試料形状が針状に限られるアトムプローブに適した試料作成法の開発が必要である。

本研究では、上記した従来の問題を解決し、電子デバイス分析のための3DAPを開発する。

3. 研究の方法

3DAP装置の設計・作製等は、電界放射顕微鏡・電界イオン顕微鏡の研究を進展させ、アトムプローブの研究者として日本の草分けを担ってきた金沢工業大学の西川治教授に協力を得て、金沢工業大学谷口教授と共に行う。試料作製法の開発は、透過電子顕微鏡試料作製で実用化しているFIB加工を用いたリフトアウト法を採用し、FIB利用の経験豊富な東京理科大学野島講師と共に行う。

4. これまでの成果

(1)レーザー補助直接投影型3DAP装置の設計・製作

本研究ではエネルギー補償機能を持たない直接投影型の広角イオン光学系を採用した。イオンの運動エネルギー広がりを十分に狭くするため、イオン化放出のトリガーに従来の電圧パルスではなくパルスレーザーを採用した。電圧パルスを用いないことは同時に、絶縁体試料に対してもトリガーをかけることを可能とした。この3DAP装置の基本性能を実験により明らかにした。検出可能な試料先端からのイオンの放出角度は約60度、

検出範囲は直径 100nm 以上、飛行時間型質量分析の分解能は検出器の傾きを補正することにより半値全幅で約 300 を達成した。

(2) 微小引出電極の最適化

本研究では、微小引出電極の考案者でもある金沢工業大学の西川治教授の協力を得て、微小引出電極を用い試料先端付近に強い放射状電界を形成させた。シミュレーションによって決定された電極形状及び試料と電極の距離を、試料電極一体型試料台により実現した。また、純金属試料に対する 3DAP 測定から試料と電極の最適な条件を明らかにした。電極の有無によって、試料への印加電圧を 3 分の 1 程度に抑えることが可能となった。

(3) アトムプローブにおけるレーザーイオン化機構の解明

アトムプローブにおけるレーザートリガーは、現象としては既に知られており、レーザーを実装した市販機も発表されている。しかしながら、アトムプローブにおけるレーザー補助イオン化の機構に関しては未だ現象としての理解が十分なされておらず、波長やエネルギー密度に関する最適化は手探り状態でなされている。本研究では、レーザー補助イオン化に用いるレーザーの波長、強度及び偏光方向を変化させ 3DAP 測定を行った。その結果、電界蒸発電圧においてレーザー偏光方向と強度の相互作用がないことが明らかになった。この結果は本研究によって初めて明らかにされ、レーザーイオン化はレーザーによる電界変調だけでは起こらない可能性が高いことを示した。

(4) 3次元原子配列再構築アルゴリズムの開発

3DAP による原子配列イメージングは、検出された原子 1 個 1 個をそのイオンの放出方向と質量 (元素) の情報に基づき積み上げていくことでなされる。この手続きは分析前後の表面構造特に先端曲率半径が既知であることが前提である。最終目的は、先端曲率半径が不明、検出器の検出効率が 60%程度であること、金属試料以外では多原子イオンが生成することを適切に対処できる 3次元原子配列再構築アルゴリズムの開発である。これまでに、これらを仮定した 3次元原子配列再構築アルゴリズムを開発し、3次元配列の可視化に至っている。

(5) FIB 加工による実デバイスからのサンプリング方法の確立

実デバイスの 3次元原子レベル解析においては、デバイスサイドから指定された特定部位を対象として 3DAP 分析を実施する必要がある。この目的のために、透過電子顕微鏡試

料作製で実用化している FIB 加工を用いたリフトアウト法を採用した。FIB 加工による 3DAP 試料作製は既に試みられているが、FIB による試料へのイオンの打ち込みが問題となっている。従来の試料作製法は試料先端方向から加工を行うため、分析したい部位つまりは試料先端に打ち込みが生じている。本研究では、試料後方から FIB を照射することにより試料先端に FIB を照射しないように工夫した。この方法によりイオン打ち込みは従来法に比べ 1/10 以下に低減できた。

5. 今後の計画

レーザー補助直接投影型 3DAP 装置の設計・製作については、試料冷却、FIM の導入、測定の自動化を計画している。レーザーイオン化機構の解明では、導電性の低い試料に対してレーザーの波長、強度及び偏光方向を変化させた実験を行う予定である。3次元原子配列再構築アルゴリズムの開発では、既に作製した FIM 装置で試料の先端曲率半径を測定し、3次元原子配列再構築アルゴリズムの精度向上を実現する。また、本研究の目的である試料先端の形状が不明で、不検出イオンを考慮した 3次元原子配列再構築アルゴリズムを開発する。FIB 加工による実デバイスからのサンプリング方法の確立では、現在までに試料先端方向からの FIB 加工ではなく、試料先端に対して後方から FIB を照射することにより、イオン打ち込みを防ぐ方法を開発した。今後は、この方法を実デバイスに適用し、3DAP 測定によって開発したサンプリング方法の評価を行う予定である。

6. これまでの発表論文等

(1) N. Mayama, S. Mikami, S. Ito, T. Kaneko, T. Iwata, M. Taniguchi, M. Owari, Dependence of Field Evaporation Voltage on Polarization Angle of Femtosecond Laser in 3D Atom Probe, e-JSSNT, 7, 70, 2009.

(2) N. Mayama, C. Yamashita, T. Kaito, M. Nojima, M. Owari, The stress of the needle specimen on the three-dimensional atom probe (3DAP), Surf. Interface Anal. 40, 1610, 2008.

(3) T. Kaneko, S. Ito, C. Yamashita, N. Mayama, T. Iwata, M. Nojima, M. Owari, Evaluation of the instrument for three-dimensional atom probe (3DAP), Surf. Interface Anal. 40, 1688, 2008.

(4) S. Ito, T. Kaneko, C. Yamashita, T. Kaito, T. Adachi, T. Iwata, N. Mayama, M. Nojima, M. Taniguchi, M. Owari, Development of preset-type sample stage in three-dimensional atom probe, Surf. Interface Anal. 40, 1696, 2008.