

# 論文審査の結果の要旨

氏名 岩田 圭弘

本論文は8章とアペンディックスからなる。第1章はイントロダクションであり、本研究の主眼であるレーザー共鳴イオン化質量分析法（RIMS）の応用の現状について概観しながら、研究の動機および目的について述べている。第2章では、RIMSの原理と構成について一般的な説明を詳細に行い、高感度・高同位体分離度というRIMSの特徴について述べている。第3章では、本論文の2つの主題であるRIMSの半導体ウエハの表面汚染評価技術への応用および原子の超微細構造観測への利用における有用性について、他の手法と比較しながら述べている。第4章では、カリウム原子に対する共鳴イオン化確率および予想されるスペクトルについて計算機シミュレーションを行っている。第5章では、実験装置について詳述している。第6章でRIMSを用いたカリウム原子に対する予備実験について述べ、第7章ではその本実験で求めたRIMSシステムの全検出効率、同位体分離度等について詳細に議論している。第8章では、結論とRIMSの応用の可能性について述べている。アペンディックスでは、本研究のきっかけとなった原子炉ニュートリノ実験について述べて、本編の参考としている。

RIMSはレーザー共鳴イオン化による元素の選択性と質量分析による同位体識別をセットにした微量分析手法であり、特定の原子のみを検出するものである。この方法では同重体による干渉がないことから誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）等他の分析法に比べてS/N比改善につながるとともに、加速器質量分析法（AMS）のような大掛かりな装置を必要とせず手軽に行える点で大きなメリットがある。しかし、RIMSの研究はCaやSrの同位体分析など特定の基礎研究分野に限られている。そのため本研究では、このメリットを生かした半導体ウエハの表面汚染評価技術への応用を提案した。また、共鳴イオン化に線幅の狭いCW半導体レーザーを用いることで、原子の超微細構造観測への応用についても考察した。

これらを実証するため、実験では分析対象としてウエハ表面の代表的な金属不純物の一つであるカリウムを取り上げ、波長405 nmの外部共振型半導体レーザーと波長808 nm高出力レーザーを用いて共鳴イオン化を行い、四重極質量分析計（QMS）により質量分析を行った。その結果、検出効率  $\sim 10^{-6}$ 、検出限界  $\sim 4 \times 10^8$

個を得、既存の手法の ICP-MS に比べて 2 桁低い検出限界値が得られることがわかった。このことから、既存の手法と比較して半導体ウエハの表面汚染評価への有用性が大きいと判断した。他にも、国際リニアコライダー (ILC) 用ニオブ超伝導空洞の加速電場向上のための表面不純物分析等にも有効と考えられる。また、共鳴励起用の 405 nm レーザー周波数をスキャンさせることでカリウム各同位体  $4s_{1/2}$  基底状態の超微細構造を観測し、405 nm 線における  $^{40}\text{K}$ ,  $^{41}\text{K}$  同位体シフト  $207 \pm 13$  MHz,  $451 \pm 10$  MHz を得た。 $^{40}\text{K}$  に対する測定はこれまでに報告がなく今回初めて得られたものである。

RIMS という手法自体は新しいものではないが、本研究は実証実験によって RIMS 装置システムの検出感度を実際に測定し既存の装置と比較検討することで表面汚染評価へのその有用性を示し、また存在度の非常に小さい同位体の超微細構造を観測するのに有効であることを示したという点で評価に値する。

本論文は箕輪 眞と井上慶純との共同研究であるが、RIMS の半導体ウエハの表面汚染評価技術への応用の提案は論文提出者が行ったものであり、その実証実験のための装置システムの設計・組立て、実験をするにあたっての計算機シミュレーション、データ取得や解析結果の検討も、共同研究者の協力を得ながら論文提出者が主体的に行ったものである。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認める。