

## 別紙 1 (博士論文の審査結果の要旨)

専攻名 システム創成科学専攻

氏名 MD. AMZAD HOSSAIN

太陽電池、スマートフォンなどには、様々な機能性を持つ半導体薄膜が広く利用されており、その膜にはレアメタルを含む高価な薄膜が含まれている。高速かつ高品質に薄膜を合成できることから、電界と磁界のそれぞれの方向が垂直になるように配置したマグネトロンスパッタ法が広く利用されている。しかしながら、プラズマが不均一に形成されるため、薄膜材料ターゲットの侵食分布が不均一になり、ターゲットの約 30%程度しか使用できず、残り 70%は廃棄されている。これまでの改善策として、ターゲットの形状を従来の平板状から円筒状に変更し、それを回転させることにより、約 70%程度まで改善がなされた。しかし、円筒状にすることで高コストとなる課題が残されている。

本論文では、資源の有効利用の観点から、従来にない磁石配置を提案し、従来の平板状ターゲットを均一に侵食できるスパッタ装置を開発することを目的としている。本研究は、半導体製造装置の中の製膜装置として注目されており、今後も更なる研究展開が期待される分野である。

本論文は全 8 章で構成されている。第 1 章では研究の背景と本研究の意義について詳細に述べている。第 2 章では、実験装置および計測方法について述べている。第 3 章では、棒磁石を正方形に配置したスパッタ装置を提案し、その特性を明らかにしている。(1)磁石を正方形配置した際の磁界分布解析結果を示し、磁石に設置する遮へい鉄片の影響を明らかにしている。(2) (1) で得られた磁界解析結果から予想されるプラズマ形状と実測によるプラズマ発光分布が一致することを実証している。(3) 提案した磁石配置により発生させたプラズマを回転させることにより、薄膜材料ターゲット利用率 87.5%を達成させ

た。更に、薄膜材料ターゲットの侵食分布とターゲットに入射するイオン電流分布の関係についても明らかにしている。

第 4 章では、第 3 章で提案したスパッタ装置を用いて合成した銅薄膜の特性を検討している。次のような研究成果を得ている。(1) プラズマ特性や放電特性に及ぼす圧力依存性を明らかにしている。(2) 銅薄膜の膜厚分布やその抵抗率分布に及ぼす正方形に配置した磁石に設置する遮へい鉄片の影響を検討した。遮へい鉄片を付加すると、膜厚分布の均一性が良くなる。抵抗率は遮へい鉄片を付加することにより、付加なしに比べて低くなり、銅バルク値とほぼ同程度になることを見出した。

第 5 章では、前章までに提案した磁石配置で侵食されていなかった部分、即ち、円板状薄膜材料ターゲットの端部を侵食させるために、新たな磁石配置を提案している。磁石配置は小さい円筒磁石を鉄ヨーク板に同心上に、かつ、その極性が同じ極になるように配置している。具体的には次のような研究成果を得ている。(1)磁石間隔  $R=5\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、 $35\text{mm}$  の 3 つの磁石配置について磁界解析を行っている。

(2) 3 つの磁石配置において観測されたプラズマ発光分布は、(1) の解析で得られた磁界分布から予想されるプラズマ形状と一致していた。(4) 3 つの磁石配置における放電特性、プラズマ密度や電子温度を明らかにしている。(5) 薄膜材料ターゲットに入射するイオン電流分布を計測し、薄膜材料ターゲットの侵食分布を予測した。

第 6 章では、第 5 章と同様な目的に基づいて、磁石間隔  $R=5\text{mm}$  と一定とし、鉄ヨークに同心上に配置する磁石数の影響を検討し、3 つの磁石配置について詳細に計測している。具体的には以下の研究成果を得ている。(1) 3 つの磁石配置とも磁界解析結果は、一番外側の磁束密度が最も高くなることを見出した。(2) (1) の磁界解析結果から予測される分布と一致するプラズマ発光分布が得られことを明らかにした。(3) 計測されたイオン電流分布はプラズ

マ発光分布と一致することを実験的に明らかにした。

第7章では、第5章と第6章で提案した磁石配置を用いたリング状パルス放電プラズマ特性を実験的に解明している。具体的には、次のような研究成果を得ている。(1) 3つの磁石配置において、磁界解析結果を用いて電子と正イオンのラーマー半径やホールパラメータなどの磁化特性を明らかにしている。

(2) 3つの磁石配置における放電電圧、放電電流、放電電力を計測し、それらの時間推移を明らかにしている。(3) 薄膜材料ターゲットに入射するイオン電流の時空間変化を詳細に計測し、興味深いイオン電流分布の時間変化を見出した。

第8章は、全体を総括し、今後の検討課題を提案している。

以上、本論文は、様々な磁石配置を提案し薄膜材料ターゲットの利用率を向上させるスパッタ装置の開発に関する重要な工学的研究成果が得られている。

平成30年7月20日に実施した博士論文公聴会においても、発表に対して種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は審査付学術論文4編、学会発表7件等で報告されており、本研究は博士の学位に値すると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士(工学)の学位を授与するに値するものと判断され、審査員全員一致で合格と判断した。