# 円筒型マグネトロンスパッタリング装置の開発と 基板に対する光学的ダメージ評価

児玉翔、古澤将司、岩田寛、田中正俊、関谷隆夫 横浜国立大学大学院 工学研究院

## Development of magnetron sputtering apparatus with hollow cylindrical cathode and optical evaluation of damage to substrate

K. Kodama, M. Furusawa, H. Iwata, M. Tanaka, T. Sekiya Faculty of Engineering, Yokohama National University

The hollow cylindrical magnetron sputtering cathode causing inner erosion is expected to give lower damage to the substrate than a conventional planar cathode. The damage to the substrate during film deposition can be evaluated by the absorption spectra of the substrate before and after sputtering. The ratio of deposition rate to absorption reduction shows the maximum near the top of the cathode cylinder and increases with increase in distance from the top of the cylinder.

## 1.はじめに

現在、スパッタリング法は真空蒸着法 などとともに物理的蒸気凝縮法(PVD 法)と よばれ、薄膜の研究、応用に不可欠な方法と なっている[1]。中でも、放電により生じる プラズマを磁石によりターゲット付近に多 く発生させるマグネトロンスパッタリング 法が主流になっている[2,3]。しかし、スパ ッタリング法は加速されたプラズマ粒子を 用いているため、高エネルギー荷電粒子の 発生、反跳ガスの基板への入射、プラズマに よる高温の発生による基板への影響が懸念 されている。そこで我々は、低ダメージ成膜 が期待されている円筒型ターゲットを採用 したマグネトロンスパッタリング装置を作 製した。円筒型ターゲットの利用は、その内 側に基板を配置することで、様々な方向か らのスパッタリングを可能にし、膜厚の均 一化やターゲットの長寿命化を図ることが できるとされている。

本研究では、円筒型マグネトロンスパッ

タリング装置の特性を知るためにラングミ ュアプローブ法を用いて成膜時の装置内の プラズマ密度を測定、評価した。また、装 置内の磁場の測定、および成膜時の基板へ のダメージの測定・評価を光学的に行うこ とを検討した[4]。

## 2.実験

本研究で用いた円筒型マグネトロンスパ ッタリング装置は、図1に示すように、全 長100mm、内径134mm、厚さ10mmの 円筒型 Zr をターゲットに用い、永久磁石 をターゲット外側に配置した。装置内の各 点を半径方向の距離 ρ と円柱の頂点から の距離<sub>z</sub>によって定義した。



### 2.1 装置特性

( $\rho$ .z)における装置内の磁場は、ガウスメ ータを用いて測定を行った。スパッタリン グ中のプラズマパラメータを調べるために ラングミュアプローブ法を用いて測定した。 スパッタリング条件として Ar 流量 50sccm、 放電時圧力 0.5Pa、放電電力 600W で行っ た。 $z = -50mm \sim 15mm$ 、 $\rho = -50mm \sim 50mm$ の 範囲で測定を行った。チャンバー内に絶縁 管で覆われた 900µm $\phi$ の Ta 線で作られた プローブを挿入し、他端を DC 電源につな ぎ正または負の電圧  $v_p$  を印加しつつ抵抗 を介してプローブに流れる電流を測定した。 2.2 基板への光学的ダメージ評価

Ar 流量 50sccm、O<sub>2</sub>流量 3sccm、放電時 圧力 0.5Pa、放電電力 600W の条件下でス パッタリングを1時間行い、成膜した ZrO<sub>2</sub> の膜厚を各膜の透過スペクトルの干渉縞か ら算出し、各位置( $z = -50mm \sim 30mm$ 、  $\rho = 0mm$ )における成膜速度  $R_D$  を求めた。

スライドガラス上にローダミン B をスピ ンコート法を用いて成膜し、これに上記の 条件下で ZrO<sub>2</sub> 薄膜が 10nm の厚さとなる ように成膜した。スパッタリングによる成 膜前後の基板のローダミン強度の変化によ りダメージ評価を行った。

## **3.結果と考察**

### 3.1 装置特性

図 2 に円筒型マグネトロンスパッタリン グ装置における、磁石の磁場の方向と強度 を示した。磁場は円筒型のターゲットを囲 むように磁石を円形に配置したため、中心 軸( $\rho = 0mm$ )の周りに回転対称な結果が得 られた。また、中心軸( $\rho = 0mm$ )上の磁場の 方向はz = 4mmにおいて変化した。これは、 ターゲット内部の磁束密度が外部よりもわ ずかに高いことを示している。



図2磁場測定概略図.

各位置( $\rho$ ,z)において測定した I-V 特性 の一例( $\rho$ ,z)=(0,-30)を図 3(a)に示す。プ ローブに印加したプローブ電圧 $v_p$ =-30V よ り低い場合、プローブ流れる電流 $I_p$ は正に 帯電したイオンによるイオン電流 $I_i$ が支配 的であり、回路に流れる観測電流 $I_p$ は負で ある。徐々に印加電圧を増加させると、プロ ーブに電子が入射し電子電流 $I_e$ が流れ始 めるため、観測電流 $I_p$ は急激に増加した。 その後、空間電子密度の飽和により、I-V 曲 線に屈曲点が観測された。図 3(a)における 接線(A)をイオン電流と見なし、I-V 曲線か



らイオン電流の影響を差し引いて算出した 電子電流 leを片対数プロットしたグラフを 図 3(b)に示す  $(I_e = I_p - I_i)$ 。このグラフの 2 つの接線(B)と(C)の交点を空間電位 $V_s$ 、 電流  $I_{es}$ とした。電子温度 $T_e$ は接線(B)の勾 配から

$$\frac{d}{dV_p}\ln(I_e) = \frac{e}{k_B T_e}$$

を用いて算出した。また、プラズマ密度 $n_e$ は

$$n_e = \frac{4I_{es}}{eS} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8k_B T_e}}$$

を用いて算出した。ここで、Sはプローブ上 部の有効表面積 (S = 0.605mm<sup>2</sup>) である[5,6]。

図4に各位置におけるプラズマ密度を示 す。中心軸(ρ=0mm)に沿ったプラズマ密 度は、ターゲット上部付近で最大値をとり、 上部からの距離が増加するとともに減少し た。また、ターゲット内部においては、中心 軸から半径方向に距離が大きくなるにつれ てプラズマ密度が高くなった。一方で、ター ゲット外部では、距離が大きくなるにつれ 減少した。これは、放電は主にターゲット内 部で発生するが、高密度プラズマの一部が 外部に沁みだしているのではないかと考え られる。



#### 3.2 基板への光学的ダメージ評価

図 5 に各位置におけるスパッタリング前 後の吸収スペクトルの吸収係数αの差Δα の一例を示す。ダメージ量は、ローダミン B の量を反映する正規化された強度(面積)

$$\Delta A = \frac{\int \left(\alpha_{before} - \alpha_{after}\right) d\lambda}{\int \alpha_{before} d\lambda}$$

を用いて表し、その結果を図 6(a)に示す。 図 6(a)から、 ΔA が z = 4mm で最少となり、 そこからの距離の増大に伴って徐々に増加 することがわかる。この増大は、スパッタリ ング成膜によるものであり、大きな運動エ ネルギーを有する反跳ガスが原因であると



考えられる[7]。成膜効率を成膜速度と吸収 係数の正規化された強度(面積)の比  $R_D/\Delta A$ で評価し、その結果を図 6(b)に示す。最も 効果的な成膜位置はz = 4mmであり、ター ゲット内部より外部の方がより成膜に適し ていると考えられる。

### 4.まとめ

成膜中のプラズマによる基板へのダメー ジ軽減を目的として、円筒型カソードを有 するマグネトロンスパッタリング装置を開 発した。ターゲット内部の磁場は、外部とは 逆方向に向いており、中心軸上の円筒型タ ーゲット上面から 4mm の位置においてほ ぼ0であった。プラズマ密度は、ラングミ ュアプローブ法を用いて評価した。プラズ マは磁場の影響を大きく受けており、その 密度はターゲット内部ではターゲットの近 く、ターゲット外部においては中心軸上で 比較的高いことがわかった。成膜した膜の ダメージは、成膜前後のローダミンBの吸 収スペクトルの変化により評価した。ター ゲット内部に基板を置いた場合、プラズマ 密度が低いにも関わらず、比較的大きなダ メージを受け、ターゲット上面から距離が 離れるほど基板へのダメージは減少してい ることがわかった。また、基板へのダメージ が最も小さいのはターゲット上面から 4mm の位置であることがわかった。成膜効 率R<sub>D</sub>/AAから光学的に基板へのダメージを 評価できると考えられる。

## 参考文献

[1] P. J. Kelly and R. D. Arnell, Vacuum 56 (2000) p. 159.

[2]篠原義明, 蒔田晃司, 松村義人, 日本金 属学会誌, 74 (2010) 610-613.

[3] 宮田隼平,他,日本金属学会誌,80 (2016) 280-283.

[4] M. Spolaore, et al., Surf. Coat. Tech. 116-119 (1999) p. 1083.

[5]雨宮宏, 他,プラズマ・核融合学会誌, 69 (1993) 934-938.

[6]雨宮宏, 他,プラズマ・核融合学会誌, 81 (2005) 482-525.

[7] H. Iwata, et al., 37th Int. Symp. Dry Process,Hyogo (DPS2015 Committee, Osaka, 2015) p.127.