

(論文)

UBMスパッタリングにおける膜厚分布の解析

Deposition Rate Simulation of Unbalanced Magnetron Sputtering



細川佳之
Yoshiyuki Hosokawa

Target erosion and deposition rate profiles of unbalanced magnetron sputtering were simulated with an electron transport particle model in a magnetic field (the Monte Carlo method) and compared with the results of balanced magnetron sputtering. The simulation results indicated that target erosion and deposition profiles of unbalanced magnetron sputtering differ from those of balanced magnetron sputtering due to changes in the electron density and the ionization rate distributions caused by magnetic field differences.

まえがき = UBM (Unbalanced Magnetron) スパッタリングは通常のマグネトロンスパッタリング (以下 BM : Balanced Magnetron Sputtering と呼ぶ) プラズマに対し磁石強度や磁石サイズを変化させる, あるいは電磁石を加えることでプラズマ領域の磁場をアンバランスにしたものである。UBM スパッタリングでは通常の BM と比較して磁力線が基板方向へのびているため, ターゲット直上で発生した電子やイオンが基板へ輸送され, それにより堆積膜の特性が改善されることが報告されている¹⁾²⁾。

一般に UBM スパッタリングを含むマグネトロンスパッタ装置では, ターゲットへ入射するイオンによりスパッタされた粒子が基板表面へ付着することで基板に堆積膜が形成される。基板表面に均一な厚さの膜を堆積させることが望まれるため, スパッタ装置を設計・開発する上で膜厚分布を予測できる解析技術が求められている。マグネトロンスパッタ装置では磁場によりプラズマを局在化させるため, ターゲット表面へのイオンフラックス

が一様でなく, ターゲットが一様にスパッタされない。スパッタされた粒子が基板表面へ到達, 付着することで成膜されるため, 基板上の堆積膜の膜厚分布はターゲット表面のエロージョン分布に依存する。したがって膜厚分布を予測するため, これまでにもマグネトロンスパッタ装置におけるターゲットエロージョン分布の数値解析に関する研究が行われてきている^{3)~5)}。本研究では, UBM スパッタリングにおいてモンテカルロ法による粒子モデルを用いたプラズマ解析によりターゲットエロージョン分布を求め, そこから基板の膜厚分布解析を行った。そして通常の BM と比較し磁場分布の変化によるターゲットエロージョンや膜厚分布の変化について調べた。

1. シミュレーションモデル

1.1 磁場分布

本解析で用いた UBM スパッタリングの軸対称 2 次元モデルを図 1 に示す。ターゲット下部の中心と外側に磁

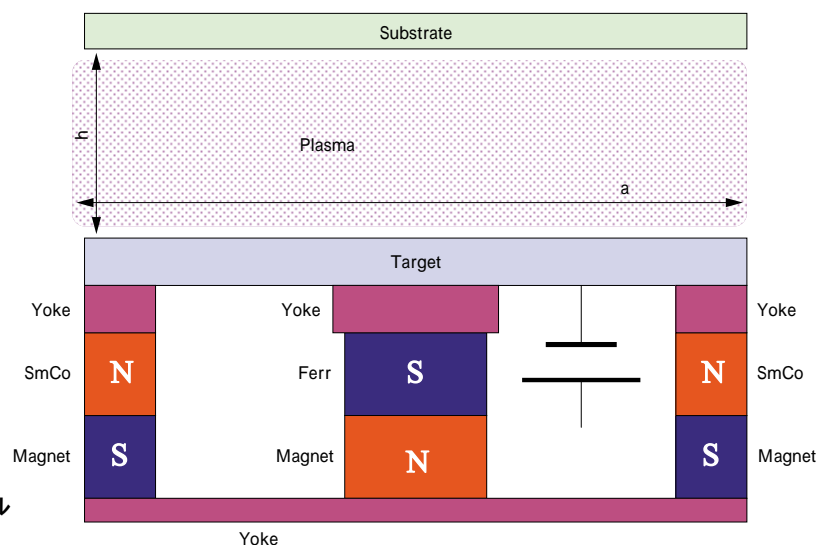


図 1 UBM スパッタリングのモデル
Fig. 1 Schematic model of UBMS

石, その下に磁性体, ターゲット上部に基板が配置されている。通常の BM では中心外側とも同じ強度の磁石を用いるのに対し, μ BM スパッタリングでは中心には残留磁束密度 0.4(T) の Ferr 磁石, 外側には 1.0(T) の SmCo 磁石を用い, アンバランスな磁場を作り出している。有限要素法により計算された磁力線分布を図 2 に示す。BM では外側磁石から上部へ出た磁力線が内側磁石へ入っているのに対し, μ BM スパッタリングでは外側磁石の方が強いので, 外側磁石から出た磁力線が一部基板の方へ伸びていることがわかる。この磁場分布を用いてプラズマ解析を行った。

1.2 プラズマ解析によるターゲットエロージョン分布予測

マグネトロンスパッタリングは, 低圧ガス中においてカソードターゲットから出た電子を磁場によってターゲット上を旋回運動させることでガス分子との電離衝突を促進し, それによって発生するイオンをシース電場でターゲット表面に引込みスパッタさせる。ターゲットエロージョン分布を予測するためには, 磁場中での電子の運動を解析し, イオンの発生とその後ターゲット表面へ入射する分布を求めなければならない。電場, 磁場中の電子の運動方程式は

$$m_e \frac{dv}{dt} = -e(E + v \times B)$$

で表される。電場 E はプラズマ中の空間電荷分布に依存するため, 厳密にはプラズマ中の電子・イオン密度分布と同時に解析する必要がある。しかしそれを実行するには大きな計算時間が必要となってしまう。本研究では実用的な計算時間で解析を行うため, バルクプラズマ中では電場が 0, シース中では Child Law Sheth

$$\text{電場 } E = \frac{4}{3} \frac{(V_{\text{plasma}} - V_0)}{s} \left(\frac{l}{s} \right)^{1/3}$$

$$\text{シース長 } s = \frac{2}{3} D_e \left(\frac{2(V_{\text{plasma}} - V_0)}{T_e} \right)^{3/4}$$

$$\text{デバイ長 } D_e = \left(\frac{T_e}{en_e} \right)^{1/2}$$

に従うものとした。この電場と磁場中で運動する電子と Ar 分子との衝突を FFT (Free Flight Time) 法⁷⁾を用いて計算した。ガスは Ar とし, 電離・励起・弾性衝突を考慮した。実際の解析では最初にターゲット表面に電子を配置し, 電子の運動の計算を進める。電離衝突が生じた場合はその位置からイオンの運動を計算し, ターゲット表面のどこに入射するかを求める。電離衝突の場合は電子を追加し, またイオンがターゲット表面へ入射した位置に 2 次電子放出係数に応じて新たな 2 次電子を配置する。バルク中で 8 (eV) 以下のエネルギーの電子は計算対象から除き, 計算の高速化を図っている。図 3 にこれらの解析モデルの概略を示している。本モデルにより,

図 2 磁力線分布の比較
Fig. 2 Comparison of magnetic flux line

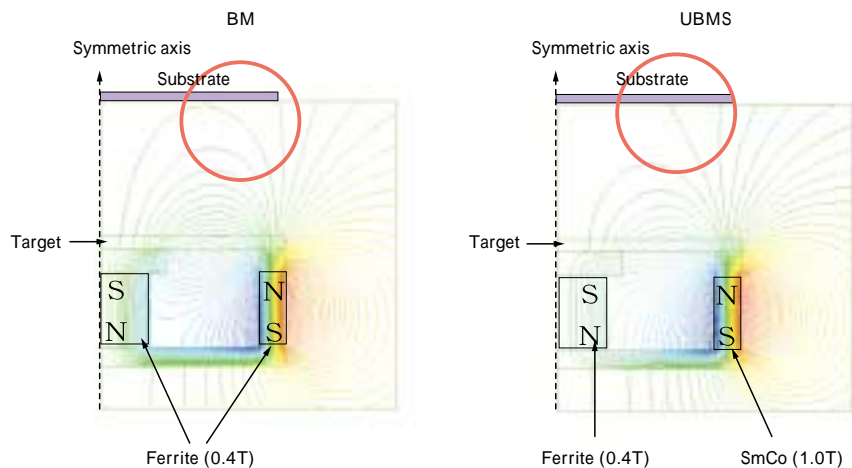
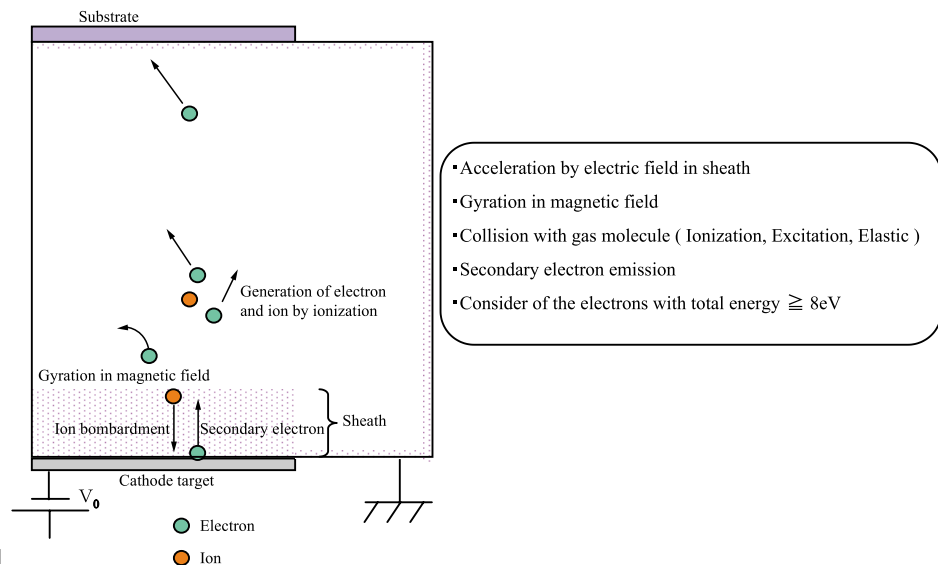


図 3 解析モデル
Fig. 3 Simulation model



パーソナルコンピュータで実用的な計算が可能となった。

1.3 膜厚分布解析手法

膜厚分布を解析するにはターゲットから飛び出すスパッタ粒子の飛び出す角度分布が必要となる。本研究では、鉛直方向に対しある角度で飛び出すフラックスが \cos に比例する余弦則を用いた。ガス圧力が低いため、ターゲットから飛び出したスパッタ粒子はガス分子と衝突せず基板に到達するものとした。ターゲット表面の全領域から飛び出し到達するスパッタ粒子フラックスを積分することで膜厚分布を計算した。

2. シミュレーション結果

2.1 ターゲットエロージョン分布

表 1 に示した条件についてシミュレーションを行った。BM と UBM スパッタリングについて 8 (eV) 以上のエネルギーを持つ電子の分布の計算結果と磁力線を重ねたものを図 4 に示している。電子が磁力線に拘束されて

表 1 計算条件
Table 1 Conditions

Cathod voltage	500 (V)
Substrate voltage	0 (V)
Target size : a	150 (mm)
Target / Substrate distance : h	50 (mm)
Gas	Ar 1.3 (Pa)
Plasma potential	0 (V)
Sheath length	5 (mm)
Secondary emission coefficient of electron	0.02

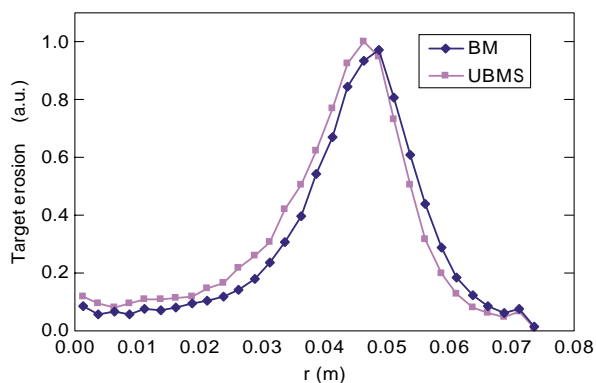


図 6 ターゲットエロージョン分布の計算結果
Fig. 6 Target erosion profiles

おり、特に UBM スパッタリングでは基板方向へ伸びる磁力線に沿って電子も基板方向へ輸送されていることがわかる。ここでは示していない低エネルギー電子も磁力線に沿って輸送されると考えられ、UBM スパッタリングでは基板近傍のプラズマ密度が大きくなり、そのことが体積膜の特性を向上させる要因となると考えられる。図 5 にはイオンの発生位置分布を示す。BM と UBM スパッタリングとは大きな違いは見られないが、磁場分布の違いにより電子密度分布が変化し、UBM スパッタリングのほうが中心よりに分布している。発生したイオンがターゲット表面へ入射する位置を計算しターゲットエロージョン分布を求めた結果が図 6 である。横軸は中心からの距離を表している。縦軸はターゲットエロージョン量の相対値を表しているが、BM と UBM スパッタリングの総エロージョン量を等しくなるように換算し比較している。UBM スパッタリングは BM に比べエロージョンの最大値が約 3 (mm) 程度ターゲット中心に近づいており、磁

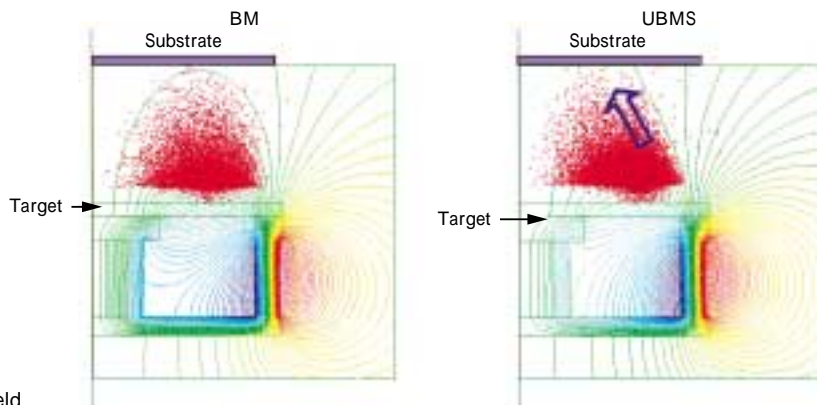


図 4 磁場中の電子分布の計算結果
Fig. 4 Spatial distribution of electron in magnetic field

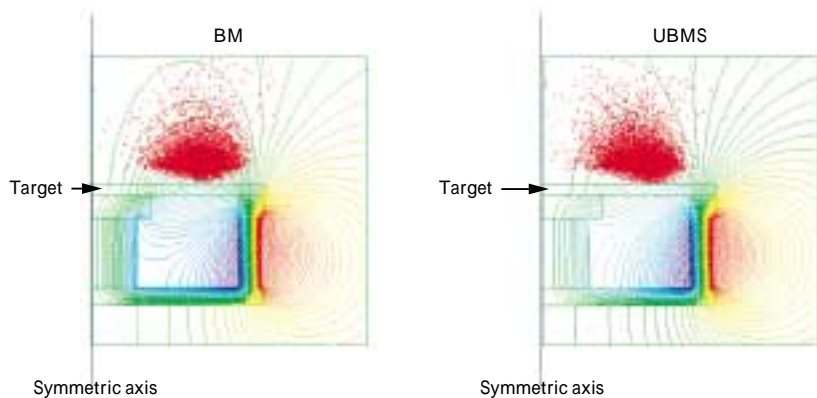


図 5 イオン発生位置分布
Fig. 5 Spatial distribution of ionization point

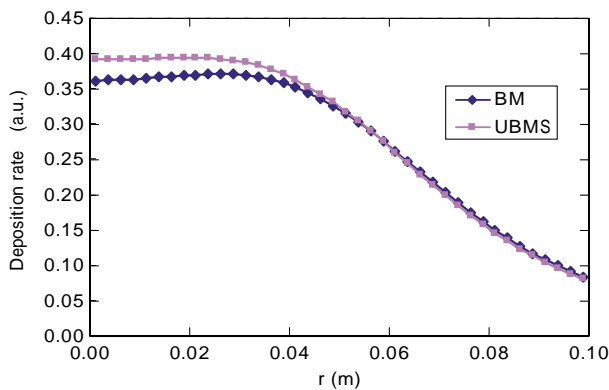


図7 膜厚分布の計算結果
Fig. 7 Deposition rate profiles

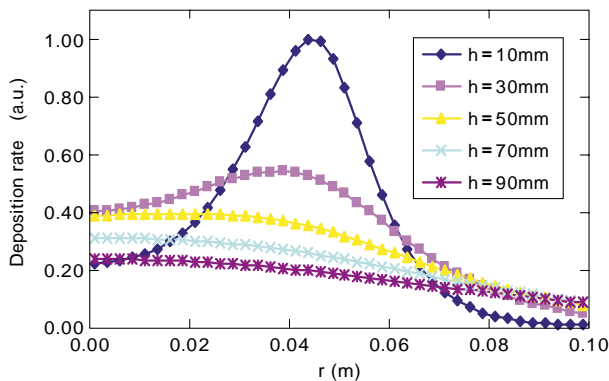


図8 UBMスパッタリングでの $h = 0.01 \sim 0.09$ (m) における膜厚分布の計算結果
Fig. 8 Deposition rate profiles of UBMS at $h = 0.01 \sim 0.09$ (m)

場の変化によるエロージョン分布の変化が表れている。

2.2 基板上的膜厚分布

ターゲット基板間距離が 50 (mm) の場合についての膜厚分布の計算結果を図 7 に示す。縦軸は成膜速度分布を示しているが、これは単位時間成膜を行った時の膜厚分布と等価である。中心から半径 50 (mm) 以内の領域では UBM スパッタリングが BM より膜厚が大きく、50 (mm) 以上ではわずかに BM の方が大きくなっている。ターゲットエロージョン分布と同様に膜厚分布についてもアンバランス磁場の影響が出ていることがわかる。次に UBM スパッタリングでターゲット基板間距離 h を 10 (mm) から 90 (mm) まで変えた場合の膜厚分布を図 8

に示す。ターゲット基板間距離が 10 (mm) の場合の膜厚分布はターゲットエロージョン分布がそのまま転写された形となっている。30 (mm) の場合は中心付近の膜厚が大きくなるが、半径 40 (mm) 付近で最大となる傾向は残っている。50 (mm) 以上では中心で膜厚が最大となり、距離を大きくするほど膜厚は小さくなる。また距離を大きくするほど膜厚分布は均一化される。静止基板に対して成膜する場合には膜厚、すなわち成膜速度の大きさと均一性との兼ねいでターゲット基板間距離を決める必要がある。

むすび= UBM スパッタリングでモンテカルロ法による粒子モデルを用いたプラズマ解析からターゲットエロージョン分布を解析することにより、膜厚分布を予測した。磁場分布の違いにより電子密度やイオン発生分布が変化することでターゲットエロージョン分布や膜厚分布も変化する結果が得られた。またターゲット基板間距離を変えた場合の膜厚分布の変化も予測することが可能であり、この技術は UBM スパッタリング装置を開発設計する上で有効であると考えられる。さらに膜質向上のため、基板付近のプラズマ状態の最適化が求められており、このためには基板近傍での電子やイオン密度、エネルギー分布などの解析技術の開発がこれからの課題と考えられる。

参考文献

- 1) E. Iwamura : Second International Conference on Processing Materials for Properties (2000) p.263.
- 2) 赤理孝一郎ほか:R&D 神戸製鋼技法 Vol.50, No.2(2000) p.58.
- 3) T. E. Sheridan et al. : J. Vac. Sci. Technol., A8 (1990) p.30.
- 4) K. Nanbu et al. : Progr. In Astronaut. & Aeronaut., Vol.160 (1994) p.428.
- 5) E. Shidoji et al. : Jpn. J. Appl. Phys., Vol.33 (1990) p.4281.
- 6) M. A. Lieberman et al. : Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley & Sons, Inc.
- 7) 電気学会技術報告(部)第140号、気体放電シミュレーション技法(昭和57年) 社団法人電気学会。