O-11

磁化同軸プラズマガンによる新奇成膜法の開発

Development of a novel film generation technique by utilizing a magnetized coaxial plasma gun

○高津幹夫[1]，宮本靖孝[1]，加藤達也[2]，佐原純輝[2]，浅井朋彦[3]，鈴木薫[4]，西宮伸幸[5]
*Mikio Takatsu[1], Yasutaka Miyamoto[2], Tatsuya Kato[2], Junki Sahara[2],
Tomohiko Asai[3], Kaoru Suzuki[4], Nobuyuki Nishimiya[5]

Abstract: A magnetized coaxial plasma gun (MCPG) is here utilized for deposition on high-melting-point metals. MCPGs have hitherto been studied mostly in the context of nuclear fusion research, for particle and magnetic helicity injection and spheromak formation. During spheromak formation, the electrode materials are ionized and mixed into the plasmoid. In this study, this ablation process by gun-current sputtering is enhanced for metallic thin-film generation. In the proposed system geometry, only ionized materials are electromagnetically accelerated by the self-Lorentz force, with ionized operating gas as a magnetized thermal plasmoid, contributing to the thin-film deposition. This reduces the impurity and non-uniformity of the deposited thin-film. Furthermore, as the ions are accelerated in a parallel direction to the injection axis, vertical implantation of the ions into the substrate surface is achieved.

１．背景・目的

磁化同軸プラズマガン（Magnetized Coaxial Plasma Gun : MCPG ）は，スフェロマック配位を持つ磁化プラズマの生成やトカマクなどへの磁気ヘリシティおよび粒子供給を目的に，主に核融合分野において研究されてきた[1]．しかし，これらの目的では，電極のスパッタによるプラズマへの不純物の混入が問題となっていた．

本研究では，この問題を積極的に利用し，溶発粒子を電磁加速させる高融点材料への新奇成膜法として，MCPG を用いた手法を開発した[2, 3]．高融点材料に対する実用的な成膜法には，イオンビームアシスト法やパルスレーザー堆積法などがあるが，これらの手法ではレーザーやビーム源が必要である．また，従来の成膜法では，溶発粒子を熱運動によって輸送し，雰囲気圧力やターゲット基板間距離によって基板への入射角を制御するため，溶発粒子の熱中性化が問題となっている[4]．本成膜法では，MCPG を用いて金属イオンを生成および電磁加速し，プラズマ生成領域から離れた基板上に高速輸送・堆積させる．よって，従来の手法に比べ，補助的な設備を使用せずに基板との付着強度の高い薄膜を生成できる他，繰り返しパルス放電によって nm オーダーで膜厚を制御できるなどの特長を有する．今回は，本成膜法の特長を活かした具体的な応用を検討するために，成膜速度や組成比制御性などの特性を評価する．

２．実験装置

（１）　磁化同軸プラズマガン

堆積ならびに注入させる金属粒子は，MCPG によって生成および輸送される．MCPG は中心電極，外部電極およびバイアスコイルで構成される（Figure 1）．これまでに研究されてきた MCPG は，その中心電極を単一材料で構成しているが，本成膜法ではターゲットとして複数の電極ピンで構成した．今回使用した各電極ピンの長さは，Ti および Zr が 20 mm, Fe が 30 mm, Al が 70 mm である．

電極間に動作ガスを導入し，放電することでプラズマを生成すると，径方向の放電電流と方位角方向の磁場による自己ローレンツ力で，プラズモイドは軸方向に電磁加速される．放電電流により中心電極の表面から溶発した材料のうち，イオン化されたものはプラズモイドと共に電磁加速され，基板へ輸送・堆積される．

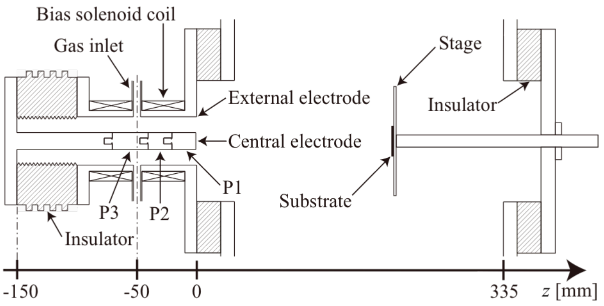

Figure 1. Diagram of the deposition system based on an MCPG. The central electrode is segmented into pins P1, P2 and P3, in order to generate an alloy film.

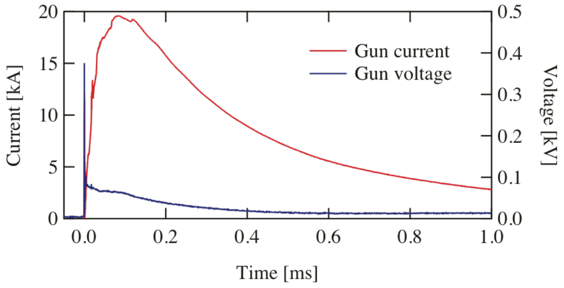

Figure 2. Typical waveforms of discharge current and voltage applied between electrodes of the MCPG.

１：日大理工・院(前)・物理　２：日大理工・学部・物理　３：日大理工・教員・物理　４：日大理工・教員・電気
５：日大理工・教員・応化

（２）　成膜装置

開発した成膜装置は，プラズマ生成部と基板ステージ部で構成され，MCPG と基板を同軸上で対向させて配置している．基板ステージ部は，MCPG およびチェンバーから熱的・電気的に絶縁されており，繰り返しパルス放電でプラズマを生成することで，基板への熱負荷を低減できる．典型的な放電電流および電極間電圧波形を Fig. 2 に示す．典型的な 1 パルス当たりのプラズマへの投入エネルギー（E_{in}）は約 300 J，平均投入電力は約 300 W，繰り返し放電周波数は 1 Hz である．

３．実験結果

（１）　成膜速度

ガラス基板上に Al 薄膜を形成し，その断面 SIM 像の観察によって，成膜速度の MCPG-基板間距離 z 依存性を測定した（Figure 3）．堆積粒子源（MCPG の断面 ϕ 40）を面とみなせるため，成膜速度は z に対して指数関数的に依存している．過去の実験では，$z = 200$ mm，$E_{in} = 300$ J において成膜速度 0.5 nm/pulse を観測していることから，$z \leq 100$ mm において，成膜速度 1 nm/pulse が実現できると考えられる．

また，ステージの中心と端部（中心から 35 mm）における成膜速度比について，$z = 100$ mm では約 0.8，$z = 150$ mm では約 0.6 であり，スパッタ法などの一般的な成膜法とは異なった傾向を示した．

（２）　組成比制御性

Cu 基板に対して，水素吸蔵合金として知られている Ti-Fe-Zr 系合金薄膜を形成し，SEM/EDX によって，組成比の電極配列依存性を測定した（Figure 4）．Zr-Fe-Ti 試料はパルス数 2500 であるが，他の試料はパルス数 5000 であるため, Zr-Fe-Ti 試料のみ基板の成分が比較的多く検出された．電極配列を変更することで，組成比を制御できることが確認された．特に，P2 に配置された材料の組成比が最大となることがわかった．

４．まとめ

電磁加速による粒子輸送を特徴とする新奇成膜法を開発し，成膜速度の MCPG-基板間距離依存性および電極配列による組成比制御性を確認した．

本成膜法は，繰り返しパルス放電（FWHM : 0.4 ms）により薄膜生成するため，繰り返し放電周波数を 10 ~ 100 Hz 程度に向上させることで, 成膜速度 10 ~ 100 nm/s を実現できると考えられる．また，過去の実験では，電極ピン以外の材料（外部電極 : SUS304 など）はほとんど堆積しないことが確認されている．そのため，電極ピンの材料・配列・長さによって，合金薄膜の組成比を容易に制御することができる．

現在，本成膜法の特長を活かした具体的応用として，歯科材料における膜と基材の中間層ならびに水素精製用分離膜の作製・評価を試みている．今後は，これらへの実証を試みると同時に，基板への膜付着強度や垂直入射特性などを評価する必要がある．

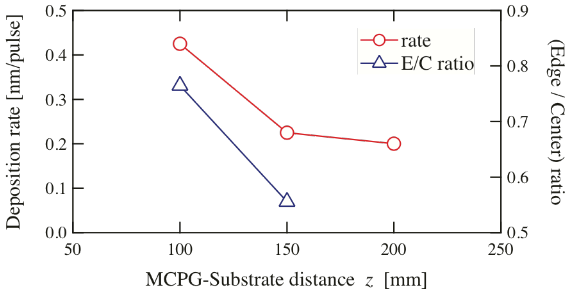

Figure 3. Average deposition rate and edge/center deposition ratio distribution for MCPG-Substrate distance z at input energy per pulse $E_{in} = 240$ J.

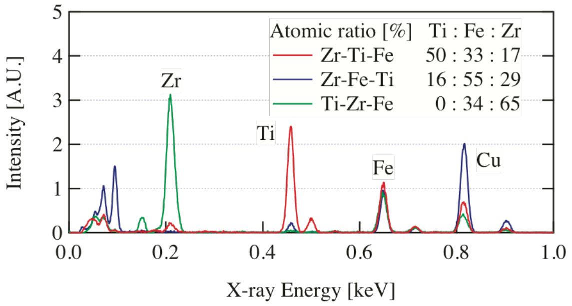

Figure 4. Characteristic X-ray spectra of samples, with differing electrode pin configuration P1-P2-P3.

謝辞

本研究の一部は「日本大学 N.研究プロジェクト：ナノ物質を基盤とする光・量子技術の極限追求」として実施されたものである．

５．参考文献

[1] T. Asai et al.: “New control methods for stabilization and equilibrium of a field-reversed configuration”, in ICC 2011 and CT workshops, 2011.

[2] T. Asai et al.: “Coaxial plasma source and film-forming device with coaxial plasma source”, *JP Pat.* 4769014, 2011.

[3] 高津幹夫　他：「磁化同軸ガンによる合金薄膜高速生成法の開発」，平成 24 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集，p.103，2012.

[4] T. Nakano and S. Baba: “Gas pressure effects on thickness uniformity and circumvented deposition during sputter deposition process”, Vacuum, Vol.80, No.7, pp.647-649, 2006.