

熱電子供給型真空アーク放電の放電電流決定機構に基づくプロセス制御

Control of Ion Flux to the Substrate in Material Processing with a Vacuum-Arc Discharge Considering Discharge Current Limitation Mechanisms

京大理工¹, 神港精機², 阪大産研³, 兵庫県立工技センター⁴, ○朝本 雄也¹, 松田 崇行¹,
濱野 誉¹, 野間 正男², 長谷川 繁彦³, 山下 満⁴, 占部 継一郎¹, 江利口 浩二¹

Kyoto Univ.¹, SHINKO SEIKI², Osaka Univ.³, Hyogo Pref. Inst. Tech.⁴, ○Y. Asamoto¹, T. Matsuda¹,
T. Hamano¹, M. Noma², S. Hasegawa³, M. Yamashita⁴, K. Urabe¹, and K. Eriguchi¹

E-mail: asamoto.yuya.78z@st.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】窒化ホウ素 (BN: Boron Nitride) は、極限環境下での高信頼性が要求される宇宙工学分野などで応用されている[1]。我々は薄膜特性を高度に制御した BN 成膜技術の確立を目指し、反応性プラズマ支援成膜法 (RePAC : Reactive Plasma Assisted Coating) と呼ばれる成膜技術を研究している[2]。BN 成膜時のイオンフラックスはイオンエネルギーとともに薄膜中の sp^2 , sp^3 結合状態を支配し、薄膜特性を大きく変化させる重要なパラメータである[3]。我々はこれまで、RePAC に搭載されたプラズマ源である熱電子供給型真空アーク放電の電離機構を解析し、イオンフラックス制御に適した外部パラメータを提案した[4]。本研究では、熱電子供給型真空アーク放電における放電電流の決定機構と、その機構がイオンフラックスに与える影響について解析する。

【実験】Fig. 1 に本研究で用いる RePAC プラズマ源の概要図を示す。タングステンフィラメントを加熱する交流電流 I_{fi} を変化させ、放射光の発光分光計測からフィラメント温度 T_{fi} を推定した。次に、アルゴンガスを導入し圧力を変化させ、各条件に対し RePAC システム内で放電実験を行った。この際、アノードに流れる放電電流 I_A と基板に流れるイオン電流 I_{sub} を計測した。

【結果及び考察】各放電条件において計測された I_A の I_{fi} 依存性を Fig. 2 に示す。熱電子放出の電流密度 j は以下の Richardson-Dushman の式で記述される。

$$j = AT_{fi}^2 \exp(-e\phi_{fi}/kT_{fi}) \quad (A: \text{リチャードソン定数}, \phi_{fi}: \text{仕事関数}) \quad (1)$$

全圧力条件で、 I_{fi} がある閾値以下の領域では、 I_A が T_{fi} 及び(1)式から予測される熱電子放出電流に従った。 I_{fi} が閾値以上の領域では I_A が飽和し、その最大値は高圧力条件ほど大きくなった。この飽和現象は、フィラメントからの熱電子及びプラズマ中のイオン密度により決定される空間電荷制限に起因するものと考えられる。また、熱電子制限領域と空間電荷制限領域のそれぞれで I_A を固定し、 I_{sub} 計測より求めたイオンフラックス Γ_i を Fig. 3 に示す。熱電子制限領域では Γ_i が圧力に関わらず一定である一方、空間電荷制限領域では圧力の上昇に伴い Γ_i が増大した。これは、放電中のイオン密度が圧力と共に増加し、空間電荷制限電流が変化したためであると考えている。

【おわりに】BN 成膜に用いる熱電子供給型真空アーク放電における放電電流決定機構を解析した。放電電流は熱電子制限と空間電荷制限の二領域に分類され、それぞれでイオンフラックスの圧力依存性が異なることが示された。熱電子制限・空間電荷制限を考慮したプロセス設計・制御が、真空アーク放電を用いた材料プロセスの高性能化に不可欠であると考えられる。

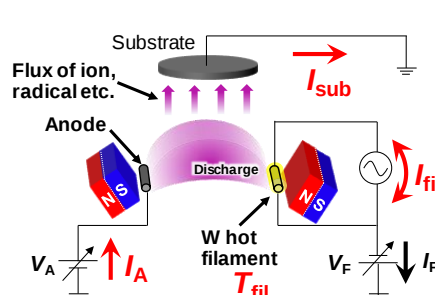


Fig. 1 Schematic illustration of the vacuum-arc discharge installed in the RePAC system.

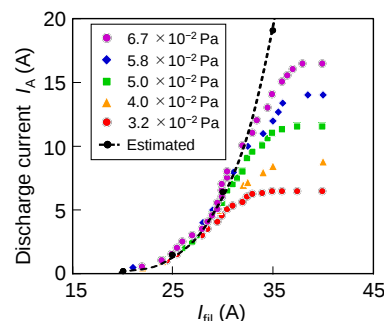


Fig. 2 Measured relationship between I_A and I_{fi} . Dotted line is a thermionic current calculated from T_{fi} estimated at each I_{fi} .

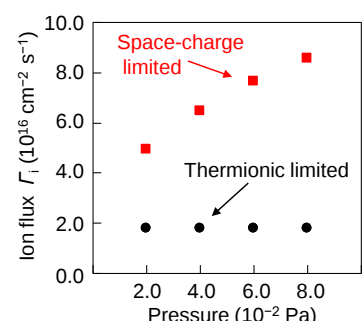


Fig. 3 Relationship between Γ_i and pressure measured in thermionic and space-charge limited regions.

謝辞 本研究の一部は科研費補助金 (20H02481), 大澤科学技術振興財団のサポートを受けたものである。

参考文献 [1] N. P. Brown *et al.*: J. Propul. Power **37**, 59 (2021). [2] T. Higuchi *et al.*: Surf. Coat. Technol. **377**, 124854 (2019). [3] S. Reinke *et al.*: Diam. Relat. Mater. **4**, 272 (1995). [4] 朝本ら: SPP38/SPSM33, LO29-PM-A-03 (2021).