

ハイパワー密度エキシマランプを用いた 裏面照射ナノ膜厚金薄膜光電陰極による気体放電

Gas Discharge Induced by a Back-illuminated Nano-thick Gold Thin Film Photocathode Using a High-power-density Excimer

大塩 亮太 (プラズマ応用研究室)
(指導教員 八田 章光 教授)

1. 研究背景と目的

大気圧プラズマは真空装置が不要であり、高い生産性が期待される技術であるが、アーク放電への移行を防ぎつつ、大面積で均一かつ安定に維持することが困難である。先行研究において、ナノ膜厚の金薄膜を用いた「裏面照射型フォトカソード」による放電手法 (PE 放電) を用いれば、空気中であっても安定した直流持続放電が可能であることが確認された¹⁾。しかし、その放電電流密度は極めて低く約 $10 \mu\text{A}$ であり、実用化には電流の大幅な増大が必要不可欠であった。本研究は、「光電陰極の膜厚最適化」および「ハイパワー密度エキシマランプ (従来比約 15 倍の出力) の導入」という二つのアプローチにより、PE 放電の電流値を実用レベルまで増大させ、大気圧空気雰囲気下における高密度かつ安定なプラズマ源の実用性を実証することを目的とする。

2. 実験方法

合成石英基板上にスパッタリング法で金薄膜を成膜し、成膜時間を $10\text{s} \sim 40\text{s}$ (計算上膜厚 3.0 nm から 12 nm 相当) で変化させ、高真空下での光電子放出特性 (I-V 特性) を評価した。波長 172 nm 、出力 315 mW/cm^2 のハイパワー密度 Xe エキシマランプ (MEUTH2-1-150-WC) を導入し、膜厚約 6 nm 金薄膜を用いて、(1) 低圧水素雰囲気 (200 Pa)、(2) 大気圧空気雰囲気 (250 sccm) における放電特性 (I-V 特性) を測定し、従来の低出力ランプ (20 mW/cm^2) と比較した。

3. 結果

3.1 金薄膜の最適膜厚

高真空下で光電子放出電流は成膜時間 15s (膜厚約 4.5 nm) で最大値 $9 \mu\text{A}$ となった。薄すぎる場合 (10s) は島状構造による導電性不足、厚すぎる場合 (30s 以上) は膜内部での電子散乱損失により電流が低下することが判明した。本研究では、ピーク値の 85% の電流を維持しつつ、熱的・物理的安定性に優れた成膜時間 20s (膜厚約 6 nm) を最適条件として採用した。

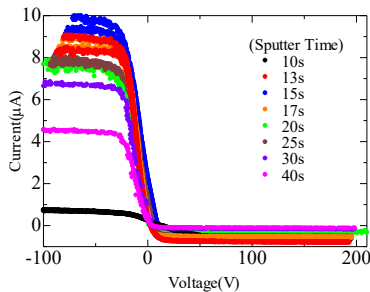


図 1 高真空下における異なる成膜時間における光電陰極の電圧電流特性

3.2 放電電流の飛躍的増大

低圧水素雰囲気 (200 Pa) において、照度 315 mW/cm^2 のハイパワー密度エキシマランプを用いることで、照度 20 mW/cm^2 の従来型ランプと比較して約 100 倍となる約 1 mA の放電電流を達成した。また、空間電荷効果による電流制限やヒステリシスといった高密度電子流特有の現象も観測された。

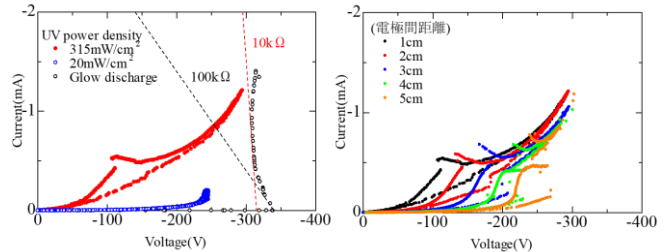


図 2 低圧水素雰囲気下における従来のランプとハイパワー密度ランプの電流電圧特性

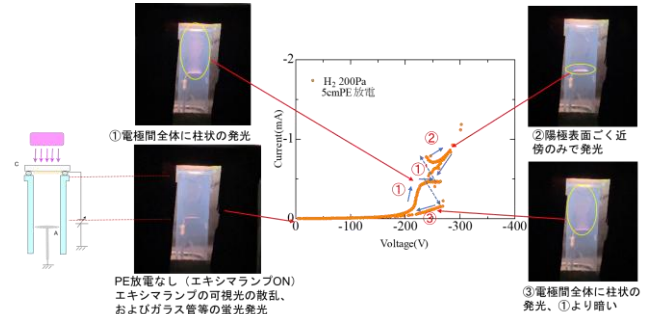


図 3 水素 PE 放電における電圧電流特性と放電形態の遷移

3.3 空気雰囲気での大気圧 PE 放電の I-V 特性

電子付着作用が強く放電維持が困難な大気圧空気中においても、ハイパワー密度エキシマランプの使用により、空気雰囲気下 (250 sccm) で $30 \mu\text{A}$ を超える安定した直流放電を達成した。これは酸素による電子消失を上回る初期電子を供給できたことによる成果である。

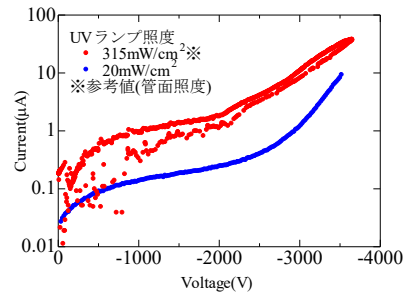


図 4 大気圧 PE 放電の光源強度による電流電圧特性

4 考察

金薄膜の膜厚最適化において、極薄膜での電流低下は島状構造による高抵抗、厚膜では膜内散乱による電子脱出確率の低下が要因であると特定し、このトレードオフに基づき成膜時間 20s を最適条件とした。低圧水素放電の高電流域で観測された発光消失は、空間が高電子密度・低電子温度の状態へ遷移したことで水素の励起確率が低下したためと推察される。大気圧空気中での電流増大は、ハイパワー光源による初期電子供給が酸素による電子付着損失を上回ったことに起因するが、電子付着による電流制限の影響も依然として大きいことが示唆された。

参考文献

1 S. W. Fitriani et al., Appl. Phys. Express 15, 116001 (2022).