

学位論文題名

Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasmas  
- Xe Excimer Lamp -

(誘電体バリア放電プラズマのモデリング - Xe エキシマランプ-)

学位論文内容の要旨

エキシマ(excimer; excited dimer)からの自然放出光を利用した光源(エキシマランプ)は、単一波長の真空紫外光(5~20eV)が高出力ならびに高効率で得られるため、乾式洗浄、表面改質、光化学気相堆積などの光化学プロセス用光源として利用が始まった。

エキシマランプの励起方式としてはガスジェット放電、パルス放電、マイクロ波放電、ホローカソード放電、誘電体バリア放電(DBD)などがこれまで提案されてきたが、その中でもDBDが有望視されている。DBDとは金属電極を誘電体で覆った電極に電圧を印加した際にギャップ間に発生する放電であり、無数のフィラメント状微小放電が電極間全体にわたって発生・消滅を繰り返すことが特徴である。この特性は誘電体バリアの存在により生ずるもので、入力電力が増してもアーク放電への移行を阻止し、高エネルギー電子を維持することが可能となる。したがって、エキシマ生成に必要な高ガス圧下でも安定動作が可能である。また、金属電極を誘電体で覆っているため腐食性の高いハロゲン原子を用いた希ガスハライドエキシマの生成も可能となる。さらに、ランプ形状の自由度が高くコンパクト化が可能であり、光化学プロセス用光源に求められる大面積化も容易であるため、これまで実用化を目的に研究・開発が行われてきた。

本研究は、DBD方式を用いたXeエキシマランプ(発光波長:172nm)内のXeガス放電プラズマ特性の理解を目的に、XeガスDBDプラズマの1次元ならびに軸対称3次元流体モデルを開発し本プラズマのシミュレーションを行なった。はじめに、1次元流体モデルを用いて電源の駆動周波数やXeガス圧を変化させた場合の解析を行い、エキシマからの発光強度や効率を様々な入力電力密度に対して算出した。次に、実用化されているランプの動作条件下で、印加電圧波形(正弦波・矩形波)や放電ギャップ長を変えた際の諸特性の変化について解析し、ランプ性能向上の可能性を検討した。また、XeガスDBDの構造を理解する目的で、その構成要素たる個々の微小放電を軸対称3次元流体モデルにより解析し、微小放電の発生から消滅までの過程を詳細にシミュレートし微小放電の内部構造を調査した。

本論文は7つの章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、放電プラズマの流体的記述の基礎となるボルツマン方程式について詳述し、本方程式から粒子数、運動量、エネルギーに対する保存式の導出を行なっている。また、本研究で用いた電極構成、電子・正イオン・励起種に関する支配方程式、Xeガス中の輸送係数について述べ、数値解析法ならびに境界条件に関して説明がなされている。

第3章では、広範囲の駆動周波数  $f$  やガス圧  $p$  における Xe ガスDBDプラズマの諸特性(電流・電圧波形、プラズマを構成する電子、正イオン、励起原子、エキシマの分

布、電界強度、平均電子エネルギーの時間的・空間的变化)を計算し、実験結果との比較により本研究で構築したモデルの妥当性を検証した。また、エキシマからの光出力  $P_{172}$  や効率  $\eta_{172}$  の入力電力密度  $P_{in}$  に対する依存性を、 $f$  や  $p$  をパラメータとして与えた結果、ランプ特性は  $f$  にはほとんど依存せず、主に  $P_{in}$  と  $p$  によって決定されることが示された。具体的には、実用化されているランプの  $\eta_{172}$  が約 10% ( $P_{in}=0.1\text{Wcm}^{-2}$ 、 $p=760\text{Torr}$ ) であるのに対し、 $p>50\text{Torr}$  のとき理想的な条件下においては  $P_{in}$  の増加に対し  $\eta_{172}$  が最大約 60% ( $P_{in}=30\text{Wcm}^{-2}$ 、 $p=400\text{Torr}$ ) にまで直線的に増加することを示した。以上のことから、高入力電力時でも高圧バリア放電を安定に維持できればランプ効率が向上するという可能性を示し、今後の技術開発に 1 つの指針を与えた。さらに、誘電体バリアがプラズマに及ぼす影響を、局所的電界強度を外部印加電界、空間電荷電界、誘電体表面蓄積電荷による電界成分に分解し、これらの時間変化を誘電体内部、誘電体近傍、放電ギャップ中央部で比較した。その結果、従来から指摘されていたとおり低駆動周波数ならびに高ガス圧下では、誘電体表面に蓄積した電荷が放電電流増加の抑制に寄与することが確認された。さらに、電源電圧反転時には誘電体バリアに蓄積した電荷が放電の維持に働くストリーマ状放電を誘起し、その結果 DBD の維持にも寄与することが新たに明らかとなった。

第 4 章では、印加電圧波形(正弦波・矩形波)ならびに放電ギャップ長  $d$  (1mm と 4mm) を変化させて、Xe ガス DBD プラズマの解析を行い、放電プラズマとランプ諸特性について評価した。波形を一意に決定するパラメータとして駆動パルス電圧の振幅  $V_0$ 、デューティ比  $r_d$ 、波形の立ち上がり速度  $v_b$  を定め、 $P_{172}$  および  $\eta_{172}$  の各パラメータおよび  $d$  に対する依存性を調査した。その結果、正弦・矩形波の両波形において、 $V_0$  および  $d$  を大きくすることにより  $P_{172}$  が増加した。また、 $v_b$  を速めることによってエキシマ生成に重要な高エネルギー電子が瞬時ではあるが大量に発生し  $P_{172}$  と  $\eta_{172}$  を増加させた。その際、 $\eta_{172}$  は最大約 73% に達した。特に  $d=1\text{mm}$  の場合には、正弦波状パルス電圧の立ち上がりを速くすると、同じ入力電力に対しても  $\eta_{172}$  が約 30% (通常正弦波電圧時) から 60% にまで約 2 倍に増加した。さらに、急峻な正弦波状パルス電圧を印加した時、同じ入力電力に対する  $P_{172}$  と  $\eta_{172}$  を比較すると、 $d=4\text{mm}$  の時と同程度の値が  $d=1\text{mm}$  でも得られ、ランプのコンパクト化ならびにランプの高効率化の可能性が示唆された。

第 5 章では、軸対称 3 次元流体モデルによる Xe ガス DBD の特徴であるギャップ内に発生する微小放電の解析を行なった。陰極側誘電体近傍に初期電子群を与えステップ電圧を印加した際に、いかなる形で微小放電が発生し消滅に至るかを調査するために、これを矛盾無く表現したモデルを構築した。本モデルの下で解析した結果、微小放電の発生から消滅までの過程は、タウンゼント期間(電子雪崩の成長)、ストリーマ期間(強い空間電荷によって発生し ns オーダの短時間でカソードへ進展する)、アフターグロー期間(誘電体表面への蓄積電荷の影響によって微小放電の進展が抑制され、その後消滅する)の 3 段階に分けられることが示され、Xe ガス DBD 放電内の微小放電の構造が明らかにされた。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔  
副 査 教 授 長 谷 川 英 機  
副 査 教 授 雨 宮 好 仁  
副 査 助 教 授 菅 原 広 剛

学 位 論 文 題 名

## Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasmas – Xe Excimer Lamp –

(誘電体バリア放電プラズマのモデリング – Xe エキシマランプ–)

エキシマ(excimer; excited dimer)からの自然放出光を利用した光源(エキシマランプ)は、単一波長の真空紫外光(5~20eV)が高出力・高効率で得られるため、半導体プロセス時の乾式洗浄、表面改質、光化学気相堆積などの光化学プロセス用光源として利用が始まった。

本ランプの励起方式としてはガスジェット放電、パルス放電、マイクロ波放電、ホローカソード放電、誘電体バリア放電(DBD)などがこれまで提案されてきたが、その中でDBDが主なものとなった。DBDとは金属電極を誘電体で覆った電極に交流電圧を印加した際にギャップ間に発生する放電であり、無数のフィラメント状微小放電が電極間全体にわたって発生・消滅を繰り返すことが特徴である。従って、入力電力が増してもアーク放電への移行が阻止されるので電子のエネルギーは高く維持され、エキシマが高ガス圧下でも効果的に生成される。

本研究は、DBD方式Xeガス放電プラズマ特性の理解とXeエキシマランプ(発光波長:172nm)の最適設計を目的に、XeガスDBDプラズマの流体モデルを開発し本プラズマのシミュレーションを行なったものである。始めに、1次元流体モデルを用いて電源の駆動周波数やXeガス圧を変化させた場合について解析し、広範囲の駆動電源周波数やガス圧に対するXeガスDBDプラズマの諸特性(電流・電圧波形、プラズマを構成する電子、正イオン、励起原子、エキシマ、電界強度、平均電子エネルギーの時空間分布)を得るとともに、ランプの光出力や効率が主として入力電力密度とガス圧に依存することを明らかにした。具体的には、現在実用化されているランプの効率が約10%であるのに対し、条件を整えれば効率は最大約60%(入力電力=30Wcm<sup>-2</sup>、ガス圧=400Torr)にまで増加することを示した。さらに、従来から低駆動周波数ならびに高ガス圧下では、誘電体表面に蓄積した電荷が放電電流増加の抑制に寄与することが指摘されていたが、本現象が定量的に確認された。また、電源電圧反転時には誘電体バリアに蓄積された電荷が放電の維持に大きく寄与することが新たに明らかにされた。

印加電圧波形(正弦波・矩形波)の振幅、立ち上がりならびにデューティ比をパラメータとして変化した場合、振幅を増し立ち上がり速度を速めることによって高エネルギー電子を大量に発生させることができ、その際、効率は最大約73%に達することが示された。

更に、軸対称3次元モデルを開発し、XeガスDBDの特徴であるギャップ内に発生する微小放電の解析を行なった。その結果、微小放電はタウンゼント放電(電子雪崩の成長)、ストリーマ(強い空間電荷によって発生しnsオーダーの短時間で陰極方向へ進展)、アフターグロー(誘電体表面への蓄積電荷の影響によって微小放電の進展が抑制され、その後消滅)の3段階に分けられることが示され、XeガスDBD放電内の微小放電の進展機構が明らかにされた。以上の諸結果から、高気圧バリア放電を安定に維持することができれば、入力電力を上げることにより、ランプ効率が向上する可能性が示され、今後ランプ

性能を向上に対する一指針が与えられた。

以上のように、本論文は真空紫外光源の励起方式として重要な誘電体バリア電極間のプラズマ特性を詳細に検討し、出力ならびに効率を予測するモデルを構築したものであり、光源プラズマならびに非平衡プラズマ工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。