

学位論文題名

Modeling of discharge-excited
ArF and XeCl excimer lasers

(放電励起 ArF および XeCl エキシマレーザのモデリング)

学位論文内容の要旨

近年、真空紫外光は、その光子エネルギーが高いという特徴を生かし、半導体プロセス、光化学、医療分野等へ利用が進められている。エキシマレーザは、高効率・高出力の真空紫外光をパルス発振するレーザであるため、これらの分野への応用を目指した光源として注目され、長パルス化、高繰り返し化、長寿命化、大出力化、大口径化、高安定化へ向けての研究開発が進められている。特に高効率・高出力の光が発振できるエキシマレーザは、励起媒質が希ガスとハロゲンガスからなり、大気圧以上の圧力で動作しなければならないため、励起に必要な均一グロー放電を安定に維持することが難しい。これを解決するためには、予備電離を行う必要がある。しかし、ある程度時間が経つと均一な放電プラズマは導電率の高いフィラメント状の放電を経てアーク放電に移行し、レーザの発振が停止する。そこで、この励起放電プラズマの進展過程を詳しく解析しプラズマ諸特性を理解することが、この不安定性発生の原因を明らかにするために極めて重要になる。

本論文は、一次元流体モデルによる高気圧放電プラズマのシミュレーション技術を開発し、これを用いて容量移行型回路によって励起された希ガスハライド系放電励起エキシマレーザ (ArF と XeCl エキシマレーザ) の放電プラズマ進展過程のシミュレーションを行ったものである。特に放電プラズマの不安定性を導く直接的な因子である空間電荷電界歪みの時間的变化について、予備電離、回路定数の違いに対し検討するとともに、誘導放出光による励起媒質を構成している粒子の光電離・光離脱が放電プラズマに及ぼす影響について論じている。

本論文は、全8章により構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と意義について述べるとともに、エキシマレーザ励起媒質プラズマのシミュレーション研究の現状を概説し、本研究の立場と目的を明らかにする。

第2章では、本論文における放電励起エキシマレーザの解析方法の中心となる粒子数密度連続の式、電子のエネルギー保存式、ポアソンの式、光子による陰極からの二次電子放出の式と誘導放出の式について述べるとともに、これらの式をもとに開発した流体モデルについて述べている。その後、外部励起回路を無視した ArF 放電プラズマに対し、本モデルと粒子モデルならびに従来の局所電界近似に基づく流体モデルによりシミュレーションを行った結果を比較、検討し、本モデルの妥当性と特徴について論じている。

第3章では、ArF エキシマレーザ励起媒質の放電プラズマ進展の基礎を理解するため

に、レーザー発振を無視したもとで行ったシミュレーション結果について述べている。まず電子密度、正イオン密度、負イオン密度、電界の時空間分布、ならびに電離、付着周波数の時間変化を明らかにし、高気圧で動作する本レーザーの放電プラズマの特徴について論じている。この結果、陰極近傍の電界が空間電荷の影響で大きく歪むこと、さらにこの歪みが不安定性（フィラメント状放電への移行）の発生へと導く可能性について論じている。また、放電光による陰極からの二次電子放出と予備電離が放電プラズマの進展過程に与える影響について検討し、両者の存在が均一プラズマを維持する上に不可欠であることを示している。

第4章では、誘導放出光による励起媒質の光電離、光電子離脱過程を考慮したモデルに基づきArFレーザーに対しシミュレーションを行った結果について述べている。ここでは、各種粒子密度、電界、レーザー出力の時空間分布を第3章の結果と比較し、レーザー光が放電進展過程に及ぼす影響について検討している。その結果、誘導放出光は、1) 放電電圧・電流波形には大きな影響を与えないが、2) プラズマ中の電子密度を2倍ならびに陰極近傍における電界歪みを1.5倍に増し、励起媒質プラズマに大きく影響する、3) 陽極近傍で電界歪みを新たに生じさせる、等のことを示した。これらの結果は、XeClレーザー放電進展の観察結果ではあるが、陰極・陽極近傍からのフィラメント状放電が発生し成長するという観測事実と定性的に良く一致している。

第5章では、励起媒質放電プラズマに及ぼす予備電離の効果について検討を行っている。通常、予備電離は紫外線またはX線により行われるが、放電空間を均一に電離することは必ずしも容易ではない。予備電離が空間的に均一に行われなければ、発振出力が低下し、また媒質放電プラズマに不安定性が生じやすいと報告されている。本章では、光軸方向に対して予備電離が均一に行われなかったモデルを取り上げ、不均一の割合に対する放電諸特性の依存性について述べ、これと予備電離が均一に行われた場合の結果を比較、検討している。その結果、均一予備電離モデルにおいてはレーザー出力の予備電離密度依存性が実験結果と良く一致し、不均一予備電離モデルにおいては、不均一の割合が増すほど予備電離密度が高い領域で陰極近傍の空間電荷電界歪みが急増することを示す。不均一予備電離の結果は、電子密度が高い領域で不安定が生じるという観測報告と一致している。レーザー出力は、不均一の割合が増すと均一に予備電離されたモデルに比べ急激に低下する結果が得られている。しかし、放電開始電圧は予備電離の不均一の割合には殆ど依存しない、等の結果について論じている。

第6章では、レーザー媒質プラズマの特性が外部回路のインダクタンス値に対し、どの様に依存するかについて述べている。具体的には本論文で採用した容量移行型励起回路の1次側および2次側のインダクタンス (L_1 および L_2) 値に対する放電プラズマ特性の依存性を検討している。その結果、1) L_1 を10 nHから100 nHまで増加させると、励起媒質への印加電圧の立ち上がり時間が遅れるとともに放電開始電圧が低下する、2) $L_1 > 100$ nHでは、陽極近傍にも空間電荷電界歪みが現れる、一方、3) 放電電流ならびにレーザー出力の最大値は $L_1 = 50$ nHに現れる、4) L_2 が10~30 nHの間ではあるが、 L_2 が増加するとレーザー出力が増加し、同時に陰極・陽極近傍の電界歪みが増大し最大レーザー出力が減少する、等の性質が解明されたことについて述べている。

第7章では、本流体モデルをXeClエキシマレーザーに用い、そのシミュレーション結果について述べている。ここでは、第3、4章で得られたArFレーザーの放電進展過程とXeClレーザーの結果を比較し、XeClレーザーの放電進展過程の特徴を述べる。その結果、1) XeClレーザーは放電光による陰極からの二次電子放出よりイオンによる二次電子放出が重要である、2) ArFレーザーと同様に放電開始直後から電界歪みが大きくなり、放

電終了直前に最大になる、3) XeC I エキシマは ArF エキシマに比べ寿命が長いのでレーザー発振は放電終了直前から起こるが、レーザー発振する以前に放電プラズマに不安定性が生じる可能性がある、等のことを示した。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主査 教授 酒井 洋 輔
副査 教授 田頭 博 昭
副査 教授 長谷川 英 機
副査 教授 山崎 初 男

学位論文題名

Modeling of discharge-excited ArF and XeCl excimer lasers

(放電励起 ArF および XeCl エキシマレーザのモデリング)

近年、高出力真空紫外光を発振するエキシマレーザは半導体プロセス、光化学、医療技術等の分野への応用を目指した光源として注目されている。しかし、本レーザは大気圧以上の圧力で動作するため、励起に要求される均一グロー放電プラズマを安定に長時間維持することが難しい。現在、この問題を解決し、発振光の一層の長パルス化、高繰り返し化、長寿命化、大出力化、大口径化、高安定化が要求されている。

本論文は、これらの要求に応えるための基礎として、在来の放電プラズマモデルを改良した高気圧放電プラズマの一次元流体モデルの開発と、このモデルを用い外部励起回路に制限されたもとで進展する ArF と XeCl エキシマレーザ励起媒質の放電プラズマ、特に空間電荷が作る局所的な電界歪、について詳細に研究した結果をまとめたものである。

本論文は以下の7章ならびに結論から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と意義について述べるとともに、エキシマレーザ励起媒質プラズマのシミュレーション研究の現状を概説し、本研究の立場と目的を明らかにしている。

第2章では、本論文における放電励起エキシマレーザの解析方法の中心となる粒子密度連続の式、電子のエネルギー保存式、ポアソンの式、光子による陰極からの二次電子放出の式と誘導放出光連続の式について述べるとともに、これらの式をもとに開発した流体モデルの妥当性と特徴について述べている。

第3章では、ArF エキシマレーザの励起媒質の放電プラズマ進展の基本を理解するために、レーザ発振を無視したもとで行ったシミュレーション結果、すなわち電子密度、正イオン密度、負イオン密度、電界の時空間分布、ならびに電離、電子付着周波数の時間変化を明らかにし、高気圧で動作する本レーザの放電プラズマの特徴について論じている。この結果、陰極近傍の電界が空間電荷の影響で大きく歪むこと、さらにこの歪みが不安定性（フィラメント状放電への移行）の発生を導く可能性を示した。また、光による陰極からの二次電子放出と予備電離が均一な放電プラズマの進展に不可欠であることを示した。

第4章では、誘導放出光による励起媒質粒子の光電離と光電子離脱過程を考慮したモデルにもとづきシミュレーションし、誘導放出光が各種粒子密度、電界、レーザー出力の時空間分布に及ぼす効果について検討した。誘導放出光は、放電電圧・電流波形には大きな影響を与えないが、プラズマ中の電子密度を2倍ならびに陰極近傍における電界歪みを1.5倍に増し、さらには、陽極近傍で電界歪みを新たに生じさせる等のことを明らかにした。

第5章では、励起媒質放電プラズマに及ぼす予備電離の不均一効果を検討している。本章では、光軸方向に対して予備電離が均一に行われなかったモデルを取り上げ、均一予備電離からのづれの割合に対する放電諸特性の依存性について述べ、これと予備電離が均一に行われた場合の結果を比較、検討した。均一な予備電離モデルにおいてはレーザー出力の予備電離密度依存性が実験結果と良く一致し、予備電離が均一に行われなかった場合には、予備電離密度が高い領域で陰極近傍の電界が空間電荷の影響により急増し、またレーザー出力は均一に予備電離されたモデルの結果に比べ急激に低下することを明らかにした。

第6章では、レーザー媒質プラズマ特性、励起回路（容量移行型）のインダクタンスL値に対してどのように依存性するかについて述べている。一次側の L_1 を10 nHから800 nHまで増加させると、励起媒質に印加される電圧の立ち上がり時間が遅れるとともに放電開始電圧が低下する。 $L_1 > 100$ nHでは陽極近傍にも空間電荷電界歪が現れるが、一方放電電流ならびにレーザー出力の最大値は $L_1 = 50$ nHに現れることを示した。二次側の L_2 が増加すると陰極・陽極近傍の電界歪みが増大し、同時にレーザー出力が減少する等の性質を明らかにした。

第7章では、XeClエキシマレーザーはArFレーザーの特性に比べ発振の遅れを始めとし諸性質が大きく異なるが、この原因は添加ハロゲンガスの種類とエキシマの生成レートならびに寿命が異なることによって生じることを明らかにした。

以上を要するに本論文はエキシマレーザーの性能向上には欠かすことのできない知識である励起媒質放電プラズマの進展過程を解析し、その特性を明らかにし、プラズマの不安定移行の原因等、多くの新知見を得たものであり、レーザー工学ならびに放電プラズマ工学の進歩に寄与するところ大である。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。