

報告番号 ^{*} 甲 第 1947 号

主論文の要旨

題名

STUDIES ON THE TRANSVERSE DISCHARGE-PUMPED XeCl

EXCIMER LASER USING RARE GAS MIXTURE DILUENT

(希ガス混合希釈を用いた横方向放電励起XeClエキシマレーザの研究)

氏名 平松美根男

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

平松美根男

放電励起XeClエキシマレーザは、紫外領域で発振する強力なコヒーレント光源として、分光学などの基礎科学の分野ばかりでなく、LSI製造プロセスなどの半導体産業等、幅広い応用が期待されている。大気圧炭酸ガスレーザや窒素レーザなどの横方向放電励起バルスレーザと装置面で類似していることから、放電励起XeClエキシマレーザの励起技術は比較的短時間に著しく進歩し、大出力化へ向けて多くの研究が行われてきた。しかし、実用的見地からは、より小型で信頼性の高いレーザ装置の実現も望まれている。一方、エキシマレーザの物性的研究の分野においては、計算機シミュレーションによる研究が多く、電子密度などの各種パラメータを実測し、それをもとに励起機構を定量的に解明する試みはほとんど行われていない。

本研究では、低ガス圧力で動作する小型エキシマレーザの製作を目的として、レーザ出力への混合希釈の効果を系統的に調べた後、Ne/Ar混合希釈を用いた小型で安定な自動予備電離放電励起XeClエキシマレーザを開発した。更に、XeClレーザ放電中の電子密度を、 H_{β} 線のシュタルク広がりから測定し、He、Ne、及びNe/Ar混合希釈XeClレーザの励起機構について論じた。以下、各章ごとに本論文の要約を記す。

第1章 序論

本章では、放電励起エキシマレーザの装置的研究及び物理機構に関する基礎研究の発展状況、問題点、本研究の意義、及び本論文の構成を示している。

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	平 松 美 根 男
------	-----	---	----	-----------

これまでに、放電励起XeClレーザの出力特性や効率を改善するために、励起回路や、予備電離技術、ハロゲンガス等に関して、様々な研究が精力的に行われてきた。Kearsley等によって提案された自動予備電離方式は、容量移行型の励起回路において、ピーキングコンデンサの充電と予備電離とを同時に行うもので、レーザ装置が小型になるばかりでなく、信頼性も大いに向上した。しかし、励起回路のパラメータや予備電離ピンギャップの配置等はいまだ完全には最適化されていないのが現状である。また、放電励起XeClレーザにおいて、希釈ガスとしてNeを用いることの有効性がSze等によって報告されて以来、一般的にXeClレーザの希釈ガスにはNeが用いられている。ところが、Neの効果が現れるのは3気圧以上の高気圧に限られ、1~2気圧程度の領域では、Ne希釈XeClレーザの効率は0.5%程度にすぎない。実用的には、低ガス圧力で高効率動作のできるレーザが望ましく、この見地からすれば、希釈ガスの効果についても一度考えてみる必要がある。

一方、エキシマレーザの発振のメカニズムを解明するために、シミュレーション等による研究も行われてきたが、レーザ放電中の電子や各種励起原子・分子、イオンなどの密度等を実際に測定した例は少なく、まだ定量的な解明には至っていない。これらのパラメータの中で、電子密度は、プラズマの基礎過程を解明するうえで基本的な量であり、最も重要と考えられる。シミュレーションによる解析の多くは、予備電離によって作られる初期電子密度を仮定することから始まっており、その結果、得られたレーザ放電中の電子を含

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

平松美根男

む各種粒子密度の値は仮定の域を出ておらず、多分に定性的である。これらのシミュレーションの結果を確かなものにし、より定量的な理解を深めるためにも、実際のレーザ放電中の電子密度を実験的に求める必要がある。

第2章 放電励起XeClレーザの出力特性における希釈ガスの効果

本章では、XeClレーザ出力の希釈ガスによる効果について述べている。

放電励起XeClレーザの低ガス圧力・高効率動作を目的として、種々の希ガス(He, Ne, Ar, Kr)及びこれらの混合ガス(Ar/He, Ne/He, Ne/Ar, Kr/Ar, Kr/Ne, Kr/He)を希釈ガスに用いて、XeClレーザの出力特性の比較を行った。この結果、Ar/He及びNe/Ar混合希釈ガスを用いることによって、低ガス圧力領域においてXeClレーザの出力特性が大きく改善されることを見いだした。ガス混合比の最適化を行った結果、2気圧以下では、Ne/Ar混合希釈XeClレーザの出力が最も大きく、全ガス圧力1.7気圧において、Ne希釈XeClレーザの2倍、Ar/He混合希釈XeClレーザの1.5倍以上であった。これより、小型で簡便な放電励起XeClレーザ装置を製作するうえで、Ne/Ar混合希釈が非常に有利であることがわかった。

第3章 小型で安定な自動予備電離放電励起XeClレーザ

本章では、2気圧以下で効率よく動作する、信頼性の高い小型の容量移行型自動予備電離放電励起Ne/Ar希釈XeClエキシマレーザ装置について述べている。

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

平松美根男

上記のレーザ装置を製作するために次の点に関して改良が加えられた。(1)放電管、メインコンデンサバンク及びスパークギャップを一体化することにより、低インダクタンスの励起回路を実現し、立ち上がりの速い電圧パルス・高い放電開始電圧を得た。(2)メインコンデンサ C_1 からピーキングコンデンサ C_2 へのエネルギーの移行を効率よく行うために、 C_1 と C_2 の比の最適化を行った。(3)有効なUV自動予備電離を得るために、ピンギャップの数や配置について最適化を行った。

この結果、全ガス圧力 1.8気圧 (Ne:Ar:Xe:HCl = 65.8:30.0:4.0:0.2)、充電電圧22kVにおいて、最大レーザ出力 40mJが得られた。最大総合効率 は1%であった(充電電圧18kV)。また、レーザパルスの再現性は非常に良く、レーザエネルギーのゆらぎは $\pm 4\%$ 以下であった。更に、Ne/Ar混合希釈XeClレーザの封じきり寿命(レーザエネルギーが90%に低下したときの動作ショット数)は 1.2×10^5 ショット以上であった。

第4章 水素H β 線のシュタルク広がりを用いた、大気圧高速パルス放電プラズマ中の電子密度測定

本章では、シュタルク効果を用いた高速パルス放電中の電子密度測定法について述べている。

水素原子からのH β 線(486.13nm)は測定し易い波長領域にあって、強度も大きく、電界の効果がよく現れるので、シュタルク法を用いた電子密度の測定に最適である。これまでシュタルク法は、主としてアークプラズマなどの電子密度測定に用いられてきた。Neあるいは

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

平松美根男

はHe放電中に、放電に影響しない程度少量のH₂を添加したときのH_β線の線幅 $\Delta\lambda_{\beta}$ と電子密度 n_e の関係は、H_β線のプロファイルにおいてシュタルク広がり が支配的である場合には、

$$n_e = C(n_e, T_e)(\Delta\lambda_{\beta})^{3/2}$$

で与えられる。ここで $\Delta\lambda_{\beta}$ はH_β線のシュタルク幅(FWHM)、 T_e は電子温度、また、係数 $C(n_e, T_e)$ は電子密度と温度の関数であるがあまり大きくは依存していない。本章の実験で測定したNe及びHeパルス放電中のH_β線のプロファイルと Griemによる理論計算とは非常に良く一致しており、シュタルク法は、エキシマレーザなどの高速大気圧パルス放電中の電子密度の有用な測定法であることが明らかにされた。

第5章 XeClレーザ放電中の電子密度

本章では、第4章で述べたシュタルク法を用いて初めて求めた、実際の自動予備電離放電励起XeClレーザパルス放電中の電子密度の測定結果を記し、続いて、He、Ne、及び Ne/Ar希釈放電励起XeClレーザの励起機構について述べている。

本実験で得られた電子密度の値は、全ガス圧力 2気圧、充電電圧 20kVの条件下において、 $1.8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (He希釈)、 $2.2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (Ne希釈)、及び $2.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (Ne/Ar希釈)であった。これらの値は、シミュレーションによって報告されているものと比較的良く一致していた。

続いて、絶対値で示した電子エネルギー分布関数の見地から、He、Ne、及びNe/Ar希釈XeClレーザの励起機構を考察した。Ne/Ar混合希

主論文の要旨

報告番号

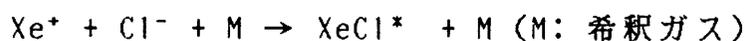
※甲第

号

氏名

平松美根男

釈の効率良い発振は、Ne希釈の電子エネルギー分布関数の形との類似性から、(1)弾性衝突による損失が小さく、電子の平均エネルギーが高いために、Xeの効率良いイオン化が期待できる、(2)XeCl*エキシマー形成の主要な反応過程である



における反応速度定数が大きい、ことによると考えられる。更に、Ne/Ar混合希釈の場合には、10eV以下のエネルギーを持つ電子密度がNeやHe希釈に比べて高いために、(3)階段励起によるXe⁺イオンの効率良い形成、及び、(4)HCl(v)の解離的付着によるCl⁻イオンの効率良い形成が期待できる。

第6章 結論

本章では、2~5章の結果を要約し、加えて、今後解決すべき課題、及び、本研究において開発したXeClレーザ装置の実際の応用面について述べている。

本研究により、混合希釈を用いた小型で信頼性の高い横方向放電励起XeClレーザ装置を開発することができた。更に、実際のXeClレーザ放電中の電子密度を測定し、放電励起Ne/Ar希釈XeClレーザの励起機構に対して新しい知見を与えた。