

報告番号 <sup>\*</sup> 甲 第 **2462** 号

## 主論文の要旨

題名

高温プラズマ診断用高出力  
パワー変調TEA CO<sub>2</sub>レーザー  
に関する研究

氏名 佐々木 浩一

# 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 佐々木 浩一

レーザーを用いた超高温・高密度プラズマの診断法は、プラズマを乱すことなく空間・時間分解に優れた測定ができるので、レーザー技術の進歩にともない、最近急速に開発が進んでいる。すでに、プラズマの基本パラメーターである電子密度および電子温度はレーザーを用いて測定するのが標準的になっており、また、プラズマ中に発生しているさまざまな不安定性の診断にもレーザー散乱計測が威力を発揮している。ところが、プラズマのもう一つの基本パラメーターであるイオン温度の測定法の開発はあまり進んでいない。現在、プラズマのイオン温度は、残留不純物や中性粒子に依存した方法により求められているが、このような方法は今後のプラズマのさらなる高密度化および装置の大型化にともない適用が困難になるものと考えられており、レーザーを用いた局所的イオン温度の測定法の開発が望まれている。その一つとして「駆動散乱法」が提案されているが、本論文は駆動散乱法において必要とされているプラズマ波動の駆動源に関する研究開発の成果を取りまとめたもので、8つの章から構成されている。

第1章では、プラズマ診断用レーザーの開発状況、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの発振特性、注入ロック方式、および駆動散乱法について概説し、本研究の背景を明らかにするとともに本研究の目的および意義を示した。駆動散乱法では、外部からプラズマにパワー変調されたレーザービームを打ち込んで、それによりプラズマ中に静電波動を励起し、励起された静電波動の伝搬特性をレーザー散乱計測により求め、それからプラズマのイオン温度が推定される。静電波動の外部駆動源としては高出力の赤外レーザーが最適であるが、その出力特性として数10MHzの周波数領域で100%パワー変調された長パルスであることが要求される。TEA CO<sub>2</sub>レーザーは高出力が得られるので静電波動駆動源の有力な候補であるが、TEA CO<sub>2</sub>レーザーを静電波動の外部駆動源として用いるためには、その出力をパワー変調する方法および長パルス化する方法を確立しなければならない。別のCO<sub>2</sub>レーザー光を主TEA CO<sub>2</sub>レーザーに注入する注入ロック方式は、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの単一モード発振を得るための方法として古くから知られていたが、ごく最近の研究により、注入ロック方式がTEA CO<sub>2</sub>レーザーをパワー変調する手法となりうる可能性が示された。本研究は、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの注入ロック動作の安定化、注入ロックTEA CO<sub>2</sub>レーザーの高出力化、およびTEA CO<sub>2</sub>レーザーの注入ロック動作に関する理論的検討の3点を通じて注入ロックによるTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調方式を確立すること、ならびに、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの出力を長パルス化する方法を開発することの二つを主な課題として行われた。

# 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 佐々木 浩一

第2章から第4章では、本研究の第一の課題であるTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調法の確立をめざした研究を行った。まず、第2章では、cw CO<sub>2</sub>レーザー光を注入光とする注入ロックによるTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調方式を実用的な技術として確立するために、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの共振器を一種のファブリ・ペロー干渉計にみたてた、注入ロック方式の安定化システムを提案・試作した。この安定化システムを用いれば、離調角（注入光の周波数と主TEA CO<sub>2</sub>レーザーの一つの縦モードの周波数との差を主TEA CO<sub>2</sub>レーザーの縦モード間差周波数で割り、 $2\pi$ をかけた量）を0または $\pi$ に帰還制御して注入ロックを行うことができる。離調角を $\pi$ に調整しておいてTEA CO<sub>2</sub>レーザーを発振させれば、周波数空間で注入光に隣接する2本の縦モードが選択的に同時発振し、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの出力は2モードのビートによりパワー変調される。帰還制御により得られる安定性をテストするために、人的な調整を行わずに連続放電実験を行ったところ、変調度が50%以上のパワー変調出力が84%の高確率で得られた。また、離調角を0に調整したときに得られるシングルモード発振は、毎回の放電毎に確実に得られた。

第3章では、第2章で開発した注入ロックTEA CO<sub>2</sub>レーザーの高出力化をはかるため、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの共振器として不安定型共振器を設計・試作し、従来の平行平面系共振器の場合の約2.5倍の出力を得た。また、試作した不安定共振器型TEA CO<sub>2</sub>レーザーにおいても、第2章で開発したのと同様の注入ロック方式の帰還制御システムを組み込み、TEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調出力を安定に得ることができることを示した。

第4章では、本研究で提案したTEA CO<sub>2</sub>レーザーの注入ロック動作の理論モデルとそれにもとづく計算機シミュレーション結果を示した。本研究で取り扱った、注入ロックによるTEA CO<sub>2</sub>レーザーの2モード同時発振現象は、従来までの理論モデルでは説明することができなかった。そこで本研究では、従来の理論モデルを現象論的に拡張して、注入光が周波数空間でその両側にあるTEA CO<sub>2</sub>レーザーの2本の縦モードと結合するものとし、それら2モードとその他の多くの縦モードとの間の競合を調べた。また、従来用いられていた数値計算方法のもつ誤りを指摘し、基礎方程式のもつ意味に忠実に非線形方程式群を解く新しい数値計算手法を提案した。導入した理論モデルをこの数値計算手法を用いて解いたところ、実験結果とよく一致したシミュレーション結果が得られた。本理論モデルは第一原理から導出されたものではないが、得られたシミュレーション結果が実験結果とたいへんよく一致していることから、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの動作特性の各種パラメー

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	佐々木 浩一
<p>ター依存性を計算機シミュレーションにより調べるのに本理論が適用可能であることが示された。</p> <p>第2章および第3章で、注入ロックによるTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調方式が実験的に確立され、さらに第4章でこの現象が理論的にも裏付けられたことで、本研究の第一目標は達成された。第5章以下では、本研究の第2の目標であるTEA CO<sub>2</sub>レーザーの長パルス化法の開発を行った。</p> <p>まず、第5章では、第4章で提案した理論モデルにもとづく計算機シミュレーションコードを開発し、それをを用いてTEA CO<sub>2</sub>レーザーの長パルス化に関する計算機実験を行った。従来、簡単な実験により調べられていたにすぎない三つの長パルス化法を計算機実験により検討し、それらの間の得失を調べた。その結果、小型TEA CO<sub>2</sub>レーザーのパルス出力を主TEA CO<sub>2</sub>レーザーに注入するパルス注入ロック方式が、出力エネルギー等の観点から、最も有効な長パルス化手法であるという結果が得られた。さらに、パルス注入ロック方式を実験で実現するときレーザーシステムに要求される仕様や、従来のパルス注入ロック方式をそのまま導入するにあたっての問題点などを明らかにした。</p> <p>第6章では、パルス注入ロック方式によるTEA CO<sub>2</sub>レーザーの長パルス化の実験を行った。従来のパルス注入ロック方式では小型TEA CO<sub>2</sub>レーザーのパルス出力を注入光として用いるためにレーザー系を帰還制御できない。この点を克服するため、本研究のパルス注入ロック方式では、注入源にハイブリッド型TEA CO<sub>2</sub>レーザーを用いた。ハイブリッドレーザーのcwモードの出力を用いてあらかじめレーザーシステムを安定化しておき、その後ハイブリッドレーザーのパルス出力を注入光としてパルス注入ロックを行うことにより、従来不可能であったTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパルス注入ロック動作を安定化した。パルス注入ロックにより得られたTEA CO<sub>2</sub>レーザーのシングルモード発振出力は、従来のcw光注入ロックにより得られていたシングルモード発振出力に比べ、ゲイン・スパイクが抑制されて格段に長パルス化された。また、2モード同時発振によるTEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調出力については、パルス先頭部にゲイン・スパイクが残るものの、パルスのテール部がcw光注入ロックの場合より一定の振幅で長時間持続し、長パルス化される傾向がみられた。注入パルス入射のタイミングや離調角が長パルス化に及ぼす影響を実験的に調べ、計算機実験結果とよい一致が得られた。</p> <p>第5章の計算機実験および第6章のパルス注入ロック実験から、TEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調出力を注入ロックで得る場合、離調角を<math>\pi</math>に設定</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名
			佐々木 浩一
<p>する必要があるために注入パルスと主TEA CO<sub>2</sub>レーザーの縦モードとの結合が弱まり、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの出力にゲイン・スパイクが残ることが問題点として残っていた。第7章では、この問題点に対する解決策として、注入パルスを2周波数とする2周波数パルス注入ロック方式を提案した。この方法では、注入光の2周波数が主TEA CO<sub>2</sub>レーザーの2本の縦モードにそれぞれ離調角0で結合するので、注入パルスと主TEA CO<sub>2</sub>レーザーの縦モードとの間の強い結合が得られる。まず、2周波数パルス光源として、ハイブリッドCO<sub>2</sub>レーザーの2モード同時発振を実現した。次にこの2周波数パルスを主TEA CO<sub>2</sub>レーザーに注入したところ、ゲイン・スパイクが完全に抑制された主TEA CO<sub>2</sub>レーザーのパワー変調出力が得られた。しかしながら、ハイブリッドCO<sub>2</sub>レーザーの2モード同時発振を得るには、そのcw部の利得をしきい値以下に落とさねばならなかったもので、ハイブリッドレーザーのcw出力を帰還制御に用いる第6章で開発した安定化方式は第7章の2周波数パルス注入ロック方式にはそのまま適用できなかったが、今後の課題として、若干の改良により帰還制御が可能となる方法を提案した。</p> <p>以上第5章から第7章で、TEA CO<sub>2</sub>レーザーの長パルス化法の開発がほぼ成し遂げられた。</p> <p>最後に第8章で本研究で得られた成果を総括し、今後の課題および方針を述べた。</p>			