

審査の結果の要旨

論文提出者名 鍋川康夫

高出力レーザーは核融合や X 線レーザーの研究に用いられるために、大口径のガラスレーザー増幅器あるいはエキシマレーザー増幅器による単一ショットパルスレーザーとしてその開発の歴史がはじまった。これらの研究においては、レーザーによる光電場の強度と共に 1 パルスに含まれるエネルギーも大きな値 (kJ クラス) が必要であったため、開発されたレーザーも巨大なものであった。一方、光電場と物質の相互作用の研究が進むにつれて、エネルギーはそれ程必要では無く (mJ~J)、主に瞬間的な光電場のピーク強度に依存する様な物理現象も見い出されており、これらの研究を行う為には、繰返し周波数が高く、高ピーク強度のレーザーが必要になってきた。この論文はこの様な現在における高出力レーザーの開発要請に応じて開発した、超短パルス高出力レーザーについて述べたものである。

第 1 章は序論として超短パルス高出力レーザーの開発に至る背景及び目的を説明しており、高強度電場中の物理現象の研究に用いる場合だけではなく、これによって得られる高次高調波を新たな光源として用いる際に超短パルス高出力レーザーの高繰返し化が重要な技術課題である事が強調されている。

第 2 章は超短パルスの発生源であるモード同期発振器についての解説である。チタンサファイアレーザー発振器に於いて実現されているカーレンズ効果によるモード同期と従来用いられてきた可飽和吸収体による色素レーザーのモード同期の原理の比較、製作したチタンサファイア発振器の性能等が述べられている。

第 3 章はパルス幅が 100fs を切る領域での超短パルス増幅の具体的な手法が紹介されている。カーレンズ効果による自己収束によって固体レーザー媒質が破壊される現象を防ぐ目的で行う「チャープパルス増幅 (CPA)」の説明の他、再生増幅とマルチパス増幅のそれぞれについて、これまで用いられてきた方法が比較されている。また、この研究で開発された増幅器で得られると予想されるパルスエネルギーの解析も行われている。

第 4 章及び第 5 章はこの論文の最も重要な部分であり、この研究の独自性を表わしている。まず、第 4 章では、20fs の超短パルスを増幅出力として得るための問題点とその解決方法が示されている。増幅によるスペクトルの狭帯域化は再生パルス整形を導入する事によって解決され、実際得られたスペクトルと計算値が比較され、良い一致をみている。分散制御については CPA の基本要素となっているパルス伸延器 (Stretcher) とパルス圧縮器 (Compressor) の解説に始まり、透過媒質による高次分散の影響を低減するために用いられてきた今までの手法が比較された。その上で、この論文に於ける独自の手法「再生増幅器共振器内プリズム対挿入法」が解析されている。この解析は光線追跡の手法による数値計算によるものであり、各光学素子による光線経路の変化等の表現法とアルゴリズムが示され、数値計算の精度が評価された上で、実際の増幅器のモデルに適用されている。この結果この手法は 20fs のパルス幅を得るために有効に働くのみならず、分散媒質の長さの変化や Stretcher-Compressor の配置の変化に対して柔軟に対応できる利点がある事が見い出された。また、解析式から得られる 2 次の分散と 3 次の分散の評価から、この分散補償の方法が有効に働く理由が定性的に説明されている。

第 5 章では高繰返しの固体レーザーで問題となる熱レンズ効果の解析と、この効果が与える影響を増幅器に於いて補償する手法が検討されている。この解析から、熱レンズの焦点距離が (フルーエンスを一定とした場合) 励起レーザーの繰返し周波数に反比例して短くなる事が示され、従来の 10Hz の増幅システムに比較して 1kHz あるいは 5kHz といった高

い繰返し周波数の増幅器に於ける熱レンズ補償の重要性が明らかにされた。熱レンズ補償の手法については、1kHzの増幅器に対して行われてきた従来の方法についての検討がなされた後、マルチkHzにも対応可能な新しい熱レンズ補償法「熱付加に対する安定擬共振器」が提案されている。凹面鏡の間隔を共焦点距離よりも長く配置したマルチパス増幅器を擬共振器とみなして解析し、この配置の安定条件から1kHz、5kHzいずれの繰返しに対しても適度なビーム径が得られる配置が存在することを見い出された。

第6章は前章までに解析検討してきた超短パルス高繰返し化の手法を用いて実際に開発したレーザーシステムの詳細が述べられている。最初に記述された1kHzの繰返しのチタンサファイアレーザーシステムは14mJのパルスエネルギーを持ち、パルス幅は2倍波発生による周波数分解光学ゲート法(SHG-FROG)による計測によって21fsと測定されている。SHG-FROGによるパルス計測によってパルスの位相も明らかになり、この結果は第4章での解析結果と良く一致している。このシステムで得られたピーク強度は0.66TWで、1kHzの繰返しのレーザーとしては開発当時最大のものである。次に述べられている5kHzのチタンサファイアレーザーシステムは、励起レーザーとして半導体レーザー励起のNd:YAGレーザーを用い、パルス圧縮前で37.7W、圧縮後で22.2Wという、超短パルスレーザーとしては最大の平均出力が得られている。これによって高繰返し増幅器に於けるSCATの有効性が証明された。さらに第6章ではチタンサファイアレーザーとKrFエキシマレーザーを組み合わせた紫外での高出力超短パルスシステムの研究成果が述べられており、10Hzの繰返してTWのピークパワーを持つ高ピーク出力レーザーおよび1kHzで7Wの平均出力を持つレーザーの開発、そしてKrFレーザーでのsub-100fsパルスの発生実験についての結果がまとめられている。

第7章は以上の結果に対するまとめである。これらの成果の多くが開発段階ですべて高出力超短パルスレーザーの分野で先進的なものであり、開発されたレーザーが世界的にも最先端であり、多くの場合世界記録を更新した。以上の内容から、この研究は物理工学に大きく寄与するものであり、よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格であると認める。