

審査の結果の要旨

氏名 アマニ イランル アブドルレザ

高強度のフェムト秒レーザーを希ガス媒質に照射して得られる高次高調波（波長変換で発生する高次の倍波）は、超短パルスでコヒーレントな新しい極端紫外(XUV)・軟X線光源として注目されている。特にアト秒パルスは、電子の自然な時間スケールで物質を研究するためのポンプ・プローブとして期待され、さらなる高強度化が求められている。このような背景を踏まえ、本論文は、テラワットを超える出力と 10fs を切る超短パルスを兼ね備えたレーザーシステムを開発し、2色レーザー場を用いた高次高調波発生に應用している。さらに、単独アト秒パルスを発生するための2色レーザー場の条件について検討している。本論文は、全6章からなっている。

第1章では、本論文の背景として、高強度レーザー技術、高次高調波発生、アト秒軟X線パルスの発生とその応用が導入されている。応用を広げるためには、アト秒パルスの高強度化が求められており、その有望な手法である **two-color gating** の実現のためには、高出力と超短パルス性を兼ね備えた基本波レーザーの開発が必要であることが論じられている。本研究では、テラワットを超える出力と 10fs を切る超短パルスを兼ね備えたチタンサファイアレーザーシステムを開発すること、それを用いて発生した2色レーザー場による高次高調波発生の **in-situ control** を研究すること、さらに数値シミュレーションによって2色レーザー場の条件を単独アト秒パルス発生に最適化することを目的とすることが述べられている。

第2章では、本研究の遂行に必要なレーザーパルスの物理を概観している。モードロッキング、チャープパルス増幅、チャープミラー、空間位相変調器、キャリアエンベロープ位相制御などの技術について説明した後、パルス幅 10fs を切るハイパワーレーザーを開発するために乗り越えなければならない課題は、光学素子や利得狭窄化による帯域制限と高次分散の補償であることを明らかにしている。

第3章では、テラワットを超える出力と 10fs 以下のパルス幅を目標にかかげ、チタンサファイアレーザーシステムの開発を行っている。帯域制限の問題を克服するため、再生増幅器で広帯域のスペクトルを得るために、高破壊しきい値を持つ広帯域反射低分散チャープミラーを作成している。また、部分反射コーティングを利用することで、利得狭窄化の補償に成功している。さらに空間位相変調を用いて、パルス圧縮後の分散を補償し各波長

成分の位相をそろえている。このようにして、第2章で明らかにした課題を克服し、レーザーシステムを構築し、目標をクリアするパルス幅 9.9fs、パルスエネルギー11mJ (>1TW) のパルス発生に成功している。

第4章では、開発したレーザーからの基本波と2倍高調波を組み合わせた2色レーザー場による高次高調波発生を行っている。これは、高強度の単独アト秒パルスの発生法として有望であるとともに、再結合電子のサブサイクルでのダイナミクスを制御することで (in-situ control) 高次高調波発生の物理を調べる興味深い方法である。基本波と2倍波の遅延時間を変えながら高調波スペクトルを測定し、偶数次高調波の強度が、基本波の周期の4分の1の周期で変調を受けていることを見出している。同時期に Dahlström からも類似の結果を報告しているが、本研究に特徴的なことは、遅延によって、高調波の強度だけではなく、波長および光子エネルギーも周期的な変調を受けていることを明確に示していることである。このメカニズムを明らかにするために、実験と時間依存シュレーディンガー方程式(TDSE)によるシミュレーションを併用した解析を行い、倍波の波長(417nm)が基本波(800nm)の半分からずれていること、基本波がチャープしていることが高調波の周波数変調をもたらすこと、またこの変調は基本波強度の影響も受けることを示している。

第5章では、高次高調波発生によって単独アト秒パルスを得るための2色レーザー場の条件を、TDSEによるシミュレーションを用いて検討している。従来、単独アト秒パルス発生には、高強度化の困難なパルス幅 5fs 程度の基本波が必要とされており、本章の目的は、10fs 程度の基本波と2倍波の組み合わせでそれを実現するための条件を明らかにすることである。10~15fs の基本波(強度 $3.2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$)と 40fs の2倍波(強度 $7.2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$)の組み合わせについて、系統的な検討をおこなっている。その結果、基本波のパルス幅が 12fs 秒以下であれば、2倍波の波長を 380nm 以下にすることで単独アト秒パルス発生が可能であることを示している。

第6章は結論であり、本論文のまとめが述べられている。

以上のように、本研究では、高強度のアト秒パルスを発生するのに必要な、テラワットを超える出力と 10fs 以下のパルス幅を兼ね備えたレーザーシステムの開発に成功している。チャープパルス増幅チタンサファイアレーザーで直接これを実現したのは、世界初の成果である。また、基本波と2倍波の相対遅延による高調波の周波数変調も新発見の現象であり、2色レーザー場による高次高調波発生過程の制御として興味深い成果である。さらに、第5章の数値解析の結果は、本研究で開発したレーザーシステムを用いた単独アト秒パルス発生が有望であることを示し、そのための2色レーザー場の条件を明らかにしている。

以上のことから、本論文は新規性、有用性、学術的価値および進捗度の観点から審査した結果、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。