

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小 菅 淳

現在観測されている可視から近赤外領域での最短パルスは 2.6 fs である。このパルス幅は、光の搬送波の 1 周期に近づきつつあり更なる短パルス化は難しい。そこで、更に短いアト秒領域のパルスを発生させるには、搬送波の 1 周期が短い短波長の光を用いる必要がある。この論文では、高次高調波を用いてアト秒パルスを発生させ、通常可視から近赤外領域のパルス波形の計測に用いられる非線形過程を用いたパルス波形の測定法を高次高調波に適用し、アト秒パルスの波形と位相を完全に決めることを目的としている。この研究は同時に極端紫外、軟 X 線領域でのコヒーレントな超短パルス光源としての高調波の地位を確立するものでもある。

第 1 章では、序論として、超短パルスレーザーの歴史、高次高調波の歴史、高次高調波のパルス幅測定 of 歴史、高次高調波の応用等を記述し、本論文の目的と意義を述べている。

第 2 章では、高次高調波の発生理論や高次高調波によるアト秒パルス発生について述べている。

第 3 章では、パルス幅測定法について記述している。始めに、一般的な相関法について説明し、2 光子イオン化を用いた高次高調波のパルス幅測定へと展開している。

第 4 章では、測定に使用した繰り返し 1 kHz のレーザーシステムと、非線形光学結晶 (BBO) を用いて、2 倍波を発生することにより、パルス幅を基本波の半分まで短くする事が可能な **Broadband Frequency Doubling** (以後 **BFD**) の原理について記述している。この **BFD** を望遠鏡型の光学系を用いることにより、ビームのパルスフロントの歪みのないパルス幅 8.3 fs のパルス (波長 400 nm) を得た。

第 5 章では、**BFD** で変換された **Ti:sapphire** レーザーの 2 倍波を用いて発生させた 9 次高調波 (波長: 44.4 nm) のパルス波形と位相を、交差相関 **FROG** (**Frequency-Resolved Optical Gating**) 法 (**XFROG**) を用いて測定した結果について述べている。測定する高調波とプローブ光 (2 倍波) の 2 光子イオン化過程を用いて、光電子の運動エネルギースペクトルを高調波とプローブ光に遅延時間をつけて測定し、得られた 2 次元マップ (**FROG** トレース) を再構築アルゴリズムで再構築することによりパルス幅 3.9 fs のほぼ位相のそろったパルスの観測に成功した。しかしながらこの交差相関法ではプローブ光の光電場の 1 サイクルすなわち 1.3 fs までしか適用できないため、アト秒パルス測定に用いることはできない。

第 6 章では、高次高調波のアト秒パルスのパルス幅を測定するため 2 光子超閾イオン化 (**Above threshold ionization** (**ATI**)) を用いてアト秒パルスの自己相関測定を行った。2 光子 **ATI** は、1 光子のエネルギーがイオン化エネルギーを超えさらに 1 光子を吸収する現象で、その発生確率はイオン化エネルギーより低い光子による通常の 2 光子イオン化よりも

低く、観測は難しい。しかしながら、著者は Ti:sapphire レーザーの 2 倍波を用いて発生させた 9 次高調波の 2 光子 ATI 過程を He において観測することに成功し、自己相関測定を行った。この 2 光子 ATI を用いることで、時間分解能の制限がないためアト秒パルスの測定が可能となった。測定は、BFD で変換された 2 倍波を均等に二つにわけ、片方に時間遅延を付け、Ar ガスに集光して高調波を発生し、9 次高調波の 2 光子 ATI 信号強度を各遅延時間で測定することにより、自己相関波形を得た。その結果、まず 9 次高調波の 1 光子スペクトル強度が最も強い条件 (2 倍波のパルス幅は 12 fs) では、パルス幅 1.3 fs を得た。高調波スペクトルのフーリエ変換で得られる相関波形と、測定した相関波形がほぼ一致しており、フーリエ限界パルスとなっている。さらに、2 倍波のパルス幅が 8.3 fs の条件で 9 次高調波の自己相関測定を行い、950 asec のパルス幅測定に成功した。1.3 fs の時と同様にほぼフーリエ限界パルスであった。

第 7 章では、前章の自己相関測定を FROG 測定まで拡張し、アト秒高次高調波のパルス波形と位相特性の同時測定を行った。まず著者は FROG 測定をおこなうため、いくつか改良をおこなった。Ti:sapphire レーザーのクリーンパルス化とパルスガスジェットの改良を行い、信号強度を 2-3 桁改良し、マルチチャンネルスケラーのアップグレードを行うことで高分解能化に成功した。これにより 9 次高調波の FROG 測定を行い、パルス幅 860 asec で一定位相のパルス波形の測定に成功した。著者はさらに、高調波スペクトルが Ar ガス濃度により変化することを見出し、ガス濃度を変化させることによりアト秒スケールでのパルス整形に成功した。

第 8 章では、本論文のまとめと展望について述べている。高調波発生ガスをより cut off エネルギーの高い Ne に変え、より高次の高調波により更なる短パルス化が可能であるとしている。

以上要するに、著者は非線形過程を用いて高次高調波のパルス波形の測定を行い 1fs を切るアト秒パルスのパルス波形の測定に初めて成功し、さらにアト秒スケールでのパルス整形の実験をおこなった。この研究の結果は極端紫外から軟 X 線領域における超高時間分解分光や非線形分光を切り拓くものである。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と認められる。