

Studies on Intense, Two-Octave Bandwidth Optical Pulses Generation and Isolated Attosecond Pulse Generation

(高出力2オクターブ帯域光パルス発生と孤立アト秒パルス発生に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、高出力のモノサイクル光パルス発生のために、高出力かつ超オクターブバンド幅を有する超短光パルス技術が必要とされている。これは、このような光パルスが、極紫外域におけるサブ100アト秒孤立アト秒パルスを効率よく発生する上で非常に有効だと期待されるからである。しかしながら、このような高出力かつ超オクターブバンド幅という両方を満たすような光パルスの発生はこれまで大きな困難を伴ってきた。

本論文では、上記の困難、すなわち出力・バンド幅のトレードオフの問題を克服することを目的として、圧力勾配を施したガス充填中空ファイバーにおける誘起位相変調 (IPM) 効果を用いることを提案し、その有用性を実験的・理論的に示す。その結果として、270-1000 nm にわたるスペクトルを有し、そのパルスエネルギーが 860 μJ である、2 オクターブのバンド幅を持ち最も高出力であるパルスの発生に成功している。このパルスは、1.5 fs, 0.3 TW, 0.65 サイクルの Fourier 変換限界パルスに相当する。

さらに、本論文では、モノサイクル光パルスによる高次高調波発生に関して、高次高調波の強度スペクトル、スペクトル位相、スペクトル分散の詳細なる理論計算を行っている。その結果、孤立アト秒パルスのさらなる短パルス化を行うには、最小の群速度分散・高次分散を持つようなスペクトル領域、すなわち強度が急激に落ちるカットオフ領域ではなくプラトーの中央領域を用いることが重要であることを明らかにしている。このスペクトル領域の選択は、半古典モデルによる、高調波次数に依存する電子の原子核への再結合時間から知ることができる。結果として、 $1.7\text{--}2.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 1.93 fs, 580 nm の Gauss 形状モノサイクルパルスにより、68 as の孤立パルスを、また、励起波長・強度をそれぞれ2倍した場合は 43 as の孤立パルスを位相補償なしに発生できることを明らかにしている。この結果は、Lewenstein モデルを基礎とした鞍点法解析、時間依存 Schrödinger 方程式によっても確認されている。

また、本論文では、このような極短の孤立アト秒極紫外パルスを測定する方法として、周波数依存スペクトルシアを用いた atto-SPIDER アルゴリズムを提案している。計算結果にり、極短の孤立アト秒極紫外パルスのスペクトル位相を精度よく再現できることが明らかにしており、これによりアト秒パルスの完全な情報を知ることができる。

第1章では、自己位相変調 (SPM) および誘起位相変調 (IPM) による超広帯域パルスの発生、空間位相変調器 (SLM) を用いたパルス圧縮、数サイクルパルスを用いた孤立アト秒パルス発生について述べる。

第2章では、希ガスガス圧力勾配がない場合・ある場合について誘起位相変調効果を記述する基礎方程式に関し議論し、入力パルスのパワー、パルス幅、圧力、パルス間時間差、ファイバー長を変化させた際の、希ガス充填中空ファイバーからの強度スペクトルについての理論計算結果の詳細を示す。

第3章では、圧力勾配のある Ar ガス充填中空ファイバー中で、SPM だけでなくを用いることにより、2 オクターブの超広帯域バンド幅を持つ高出力パルス発生実験に関して記述する。

第4章では、本研究で新たに開発した、超2オクターブ帯域を持つ液晶空間位相変調器による能動的位相補償および振幅変調実験について述べる。

第5章では、モノサイクル光励起による高次高調波発生について、キャリア・エンベロープ位相を変化させたときの、高次高調波強度スペクトル、スペクトル位相、分散に関して、理論計算により議論する。

第6章では、極短の孤立アト秒極紫外パルスを測定する方法として、周波数依存スペクトルシアを用いた atto-SPIDER アルゴリズムの提案に関して記述する。

最後に第7章で、本論文を総括し、展望を述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 森 田 隆 二
副 査 教 授 足 立 智
副 査 准教授 鈴 浦 秀 勝

学 位 論 文 題 名

Studies on Intense, Two-Octave Bandwidth Optical Pulses Generation and Isolated Attosecond Pulse Generation

(高出力2オクターブ帯域光パルス発生と孤立アト秒パルス発生に関する研究)

近年、高出力のモノサイクル光パルス発生のために、高出力かつ超オクターブバンド幅を有する超短光パルス技術が必要とされている。これは、このような光パルスが、極紫外域におけるサブ100アト秒孤立アト秒パルスを効率よく発生する上で非常に有効だと期待されるからである。しかしながら、このような高出力かつ超オクターブバンド幅という両方を満たすような光パルスの発生はこれまで大きな困難を伴ってきた。

本論文では、上記の困難、すなわち出力・バンド幅のトレードオフの問題を克服することを目的として、圧力勾配を施したガス充填中空ファイバーにおける誘起位相変調 (IPM) 効果を用いることを提案し、その有用性を実験的・理論的に示している。その結果として、270-1000 nm にわたるスペクトルを有し、そのパルスエネルギーが 860 μJ である、2オクターブのバンド幅を持ち最も高出力であるパルスの発生に成功している。このパルスは、1.5 fs, 0.3 TW, 0.65 サイクルの Fourier 変換限界パルスに相当する。

さらに、本論文では、モノサイクル光パルスによる高次高調波発生に関して、高次高調波の強度スペクトル、スペクトル位相、スペクトル分散の詳細なる理論計算を行っている。その結果、孤立アト秒パルスのさらなる短パルス化を行うには、最小の群速度分散・高次分散を持つようなスペクトル領域、すなわち強度が急激に落ちるカットオフ領域ではなくプラトーの中央領域を用いることが重要であることを明らかにしている。このスペクトル領域の選択は、半古典モデルによる、高調波次数に依存するイオン化電子の親イオンへの再衝突時間から知ることができる。結果として、 $1.7\text{--}2.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 1.93 fs, 580 nm の Gauss 形状モノサイクルパルスにより、68 as の孤立パルスを、また、励起波長・強度をそれぞれ2倍した場合は 43 as の孤立パルスを位相補償なしに発生できることを明らかにしている。この結果は、Lewenstein モデルを基礎とした鞍点法解析、時間依存 Schrödinger 方程式によっても確認されている。

また、本論文では、このような極短の孤立アト秒極紫外パルスを測定する方法として、周波数依存スペクトルシアを用いた **atto-SPIDER** アルゴリズムを提案している。計算結果により、極短の孤立アト秒極紫外パルスのスペクトル位相を精度よく再現できることを明らかにしており、これによりアト秒パルスの完全な情報を知ることができる。

第1章では、自己位相変調 (SPM) および誘起位相変調による超広帯域パルスの発生、空間位相変調器を用いたパルス圧縮、数サイクルパルスを用いた孤立アト秒パルス発生について述べている。

第2章では、希ガスの圧力勾配がない場合・ある場合について誘起位相変調効果を記述する基礎方程式に関し議論し、入力パルスのパワー、パルス幅、圧力、パルス間時間差、ファイバー長を変化させた際の、希ガス充填中空ファイバーからの強度スペクトルについての理論計算結果の詳細が示されている。

第3章では、圧力勾配のある Ar ガス充填中空ファイバー中で、SPM だけでなく IPM を用いることにより、2 オクターブの超広帯域バンド幅を持つ高出力パルス発生実験に関して記述している。

第4章では、本研究で新たに開発した、超2オクターブ帯域を持つ液晶空間位相変調器による能動的位相補償および振幅変調実験について述べている。

第5章では、モノサイクル光励起による高次高調波発生について、キャリア・エンベロープ位相を変化させたときの、高次高調波強度スペクトル、スペクトル位相、分散に関して、理論計算により議論している。

第6章では、極短の孤立アト秒極紫外パルスを測定する方法として、周波数依存スペクトルシアを用いた **atto-SPIDER** アルゴリズムの提案に関して記述している。

最後に第7章で、本論文を総括し、展望を述べている。

これを要するに、著者は超短光パルス発生の際の出力・バンド幅トレードオフ問題を克服する高出力かつ超広帯域光パルス発生法を提案し、その有用性を実験的に実証している。また、モノサイクル光パルスによる高次高調波発生において、孤立アト秒パルスのさらなる短波長化のための最適なスペクトル領域選択法を理論的に明らかにしている。これらは、超短光パルス発生技術・超高速レーザー物理に関する新たな知見を得たものであり、応用物理学に関して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。