

論文審査結果の要旨

氏名 足立俊輔

本論文は、搬送波位相 (carrier-envelope 位相) を安定化した強力パルス光源を開発し、これを用いて搬送波位相に依存した物理現象を見出したものである。搬送波位相は、超短パルスレーザー電場の包絡線のピークに対する内部振動電場 (搬送波) の相対的な位相として定義される (より厳密には、周波数領域におけるスペクトル位相構造を用いて定義される)。近年、搬送波位相が高次高調波の発生や超関イオン化などの過程に大きな影響を与えることがわかり、研究が活発化している。しかし、搬送波位相の安定化技術や検出技術は発展途上にあり、搬送波位相に依存する物理現象の例そのものが少ないのが現状である。

本論文は7章から構成されている。第1章ではこの論文の構成を紹介し、第2章では搬送波位相の概念とその重要性、制御の方法などに関する研究の歴史と現状について概観している。

第3章では、非共直線光パラメトリック増幅器 (NOPA) の設計と構成について述べている。チタンサファイア再生増幅器からの基本波 (800nm) の2倍高調波 (400nm) を NOPA のポンプ光として用意する。つぎにこれと同じ高調波を用いて自己位相変調による白色光を発生し、両者を非線形結晶に入射することにより、パラメトリック増幅を行う。これによって、入射光子は周波数の低い2つの光子 (シグナル光とアイドラー光に分かれる。こうして得られたアイドラー光は、1オクターブ (2倍の周波数) にわたってスペクトルが広がっているが、搬送波位相が自己安定化されるという著しい特性を持っている。その原理は所属研究グループの前任者によって示されていたが、申請者は、白色光発生媒質として回転 CaF_2 を用いることで、初めて実用に耐え得る高強度かつ長時間安定な光源とすることに成功した。

第4章では、NOPA から発生したアイドラー光の圧縮と、その特性評価について述べている。周波数にして2倍にもスペクトルが広がったパルス光を圧縮するのは技術的に非常に困難であるが、申請者は可変形状鏡を組み込んだ光学系を用いて、アイドラー光を圧縮することにより、その中心波長 970nm の光電場の 1.3 周期分という単サイクルに近い光パルスが得られることを示した。これは、可視、近赤外領域における光サイクル数としては世界最短の記録であり、今後、搬送波位相敏感な高次非線形現象を研究していくうえで、非常に有用なものになると予想される。

第5章では、アイドラー光の短波長端とその2倍高調波の長波長端がスペクトル的に重なることに着目し、これらを干渉させ、相対位相を検出した。更にその位相情報を使って、2倍高調波発生光学系の途中に入れた CaF_2 板の角度を制御し、搬送波位相を制御するシステムを構築した。さらに、この装置は次章で行う実験に十分な精度の制御性能があることを確認した。

第6章では、上記の装置によって搬送波位相制御されたアイドラー光を用い、試料として高分子に閉じ込められたアゾ色素を用いて、光ポーリングの実験を行った結果について記述している。NOPA のアイドラー光のうち、1600nm と 800nm のスペクトル成分の位相を調整して試料に照射すると、1光子過程と2光子過程の干渉により、電気双極子をもった分子を配向させることができる。これを光ポーリングと呼ぶ。続いて 1600nm の光のみを照射すると、分子が配向したた

めに反転対称性が破れているので、2 倍高調波が発生する。これを測定してポーリングの状態を検出する。搬送波位相を制御しながらこの実験を行うことにより、ポーリングの向きおよび効率は搬送波位相に依存することを示した。これにより、搬送波位相に依存する新たな物理現象を見出すという当初の目的を達成した。この実験は、搬送波位相が制御された再生増幅による尖頭値の高い光パルスを用いて初めて可能になったものであり、当該分野の発展に大きく寄与する成果である。

第 7 章では以上の成果を踏まえて、今後の展望について議論している。

本研究のテーマは当該研究室で継続的に行われてきた搬送波位相制御の研究の一環として行われたものであり、複数の共同研究者が関与しているが、本論文の重要な部分、すなわち帰還ループ制御による搬送波位相安定化強力光源の開発と、ポーリングによる搬送波位相敏感現象の実証は、ほとんど申請者が独力で遂行したものと認められる。

以上の理由により博士（理学）の学位を授与できると、審査委員全員の一致によって、判断した。