

審査の結果の要旨

論文提出者：芦原 聡

光強度に依存して屈折率が変化する非線形屈折率効果（または光カー効果）は、自己収束効果や自己位相変調効果、光双安定、光ソリトン、4光波混合による位相共役波発生など特異で多様な光学現象を引き起こし、光波の非線形制御など量子エレクトロニクスやフォトニクスの分野で重要視されている。通常この非線形屈折率効果には3次の非線形光学効果が利用される。ところが、2次の非線形光学効果のカスケーディングにより、実効的に3次の非線形光学効果が生じることが知られている。具体的には、第2高調波発生とその逆過程を同時に引き起こすことにより、光波の位相に非線形項を付加する事ができる。このカスケード2次非線形光学効果の優れている点は、波長変換を利用するため高速であることと、第2高調波発生を制御することにより実効非線形屈折率の大きさや符号をコントロールできることにある。本論文の著者は、この2つの特徴を活かし、超短パルス光に対しカスケード非線形光学効果を適用し、フェムト秒領域における光ソリトンパルス圧縮を成功させた。光ソリトン発生には屈折率分散と逆符号の非線形屈折率が必要となるが、多くの光学材料では実用波長域で両者が同符号となるため光ソリトン発生は不可能であった。ところが、カスケード非線形屈折率効果の導入により、2次の非線形光学媒質においてこれが可能となったのである。

本論文は7章と3つの付録からなる。

第1章は序論で、本研究の背景と論文の構成が述べられる。

第2章は「非線形光学媒質における超短光パルスの伝搬」と題し、非線形光学効果を介して相互作用しながら分散媒質中を伝わる超短光パルスとその第2高調波に対する理論的な取り扱いがまとめられている。始めに、理論の出発点となる結合波方程式が、2次および3次の非線形光学効果、群速度とその分散の効果を取り込んだ形で導かれる。詳細は付録A「結合波方程式の導出と数値計算法」にまとめられている。この方程式に基づき、取り扱いの簡単な連続波に対し、第2高調波発生、擬似位相整合法、カスケード非線形光学効果の基礎的な事実が紹介される。続いて、パルス光の伝搬、特にソリトン伝搬とそれを用いたパルス圧縮法について、簡潔に述べられる。

第3章は「BBO非線形結晶を用いた光ソリトン圧縮」と題し、代表的な非線形光学結晶であるベータほう酸バリウム(BBO)を用いた光ソリトン圧縮についての数値解析および実験結果が述べられる。始めに、 z スキャン法を用い、実効的非線形屈折率の大きさを求め、カスケード非線形屈折率の最大値は真性非線形屈折率の9倍程度になることが判った。この結果は期待される値より小さいが、それは群速度不一致によるものと考えられる。次に、光ソリトン伝搬を数値解析し、パルス圧縮の可能性を議論している。この配置では基本波と第2高調波で群速度が一致しないため、両光波が互いにトラップし合い共通の群速度をもって進むウォーキングソリトンとして振る舞う事が示された。以上の数値解析結果を踏まえ、光源に波長800 nmのチタン添加サファイアレーザーを用いた実験を行い、パルス幅135 fsの入射光を45 fsまで圧縮する事に成功している。な

お、パルス波形の測定には周波数分解光ゲート法を用いたが、これについては付録 B に詳しく述べられている。

第 4 章以下では、波長変換の高機能化を目指し、周期分極反転素子を用いた擬似位相整合法について論じられる。第 4 章「周期分極反転 LiTaO_3 におけるカスケード非線形効果の評価」では、タンタル酸リチウムの周期分極反転構造を作製し、カスケード非線形屈折率を測定した結果について述べられる。周期分極反転構造の作製プロセスは、付録 C「周期分極反転素子の作製」に詳しい。本章では、周波数分解 2 光波混合法を用い、結晶単体および周期分極反転素子の非線形屈折率を測定している。この測定では、真性非線形屈折率には偏光方向に対し大きな異方性のあることという結果が得られた。異方性は理論的には予測されているが実際の測定例はほとんどない。続いて、周期分極反転素子のフェムト秒レーザーに対するカスケード非線形屈折率を測定した。以上の測定によりタンタル酸リチウムについての基礎的なデータが求まったが、カスケード非線形屈折率と真性非線形屈折率の差が小さく光ソリトン圧縮には向かないことが判明した。これも、群速度の不一致のためカスケード非線形屈折率を大きく取れないことに原因がある。

第 5 章は「周期分極反転 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ を用いた光ソリトン圧縮」と題し、周期分極反転マグネシウム添加ニオブ酸リチウムのタイプ 1 の擬似位相整合を用いた光ソリトン圧縮の実験結果が述べられている。ここでタイプ 1 の擬似位相整合を用いる理由は、波長 1560nm で群速度整合が達成できることにある。このため時間的ウォークオフの影響から逃れられ、大きなカスケード非線形屈折率が得られる。チタン添加サファイアレーザーをポンプ光源とするパラメトリック増幅器により波長 1560 nm パルス幅 80 fs のパルス光を発生し、カスケード非線形屈折率を測定した。その結果、フェムト秒領域ではこれまで報告された中で最大のカスケード非線形屈折率が得られる。さらに、パルス幅 110 fs のパルス光を用いて光ソリトン圧縮の実験を行い、パルス幅 35 fs の基本波と第 2 高調波を同時に得ることに成功した。これらの結果は、数値計算によって理論的に確かめられた。

カスケード非線形光学効果を用いたパルス圧縮では、群速度整合を満足することが不可欠の要因である。第 6 章「非平行擬似位相整合を用いた群速度整合法」では、2 次元配置を用いれば、位相整合と群速度整合を同時に満足させることが可能であることを提案し、数値計算による評価と原理実験が報告されている。

第 7 章は本論文の総括に充てられている。

以上を要するに、本論文の意義はカスケード非線形光学効果の適用範囲をフェムト秒レーザーに拡大し、光ソリトン圧縮の有効性を実証したことにある。このパルス圧縮法は、従来法に比べ光学系が簡単でエネルギー利用率も高く、簡便な方法として実用価値も高い。さらに、フェムト秒パルスの波長変換では位相整合だけでは不十分で群速度の整合が重要であることを指摘し、このための新しい擬似位相整合配置を提案した。このように、本論文は量子エレクトロニクス分野に多大の貢献をした。よって、本論文は物理工学に寄与するところ大であり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。