

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤岡 伸秀

レーザー光の短パルス化技術はレーザー発明以来着実に進歩してきた。可視域では、単一サイクルに近い極限的なパルスが実現している。一方、応用の観点からは、数10フェムト秒(fs)から数100 fs程度のパルス幅を持ち、中心波長が所望の値を取る光パルスに対する需要が高まっている。しかし短パルス光を直接発生できるレーザー光源は限られているから、広い波長域をカバーするためには、非線形光学を用いた波長変換技術の開発が不可欠となっている。波長変換技術は各種の位相整合法の発明により、連続光やナノ秒程度のパルス光に対しては成熟してきている。ところが、フェムト秒領域では、群速度不整合の補償が解決すべき問題として残されている。これは、入射波と波長変換された波の群速度が一致しないときに生じる不都合で、相互作用するパルスは媒質中を異なる速度で進むことになるから、光軸上でパルスが分離してしまう時間的ウォークオフという現象を引き起こす。この現象は周波数領域では位相整合条件を満たすスペクトル帯域の不足と等価である。すなわち、パルス幅を短くするためにはスペクトル帯域を広げなくてはならない。ところが、位相整合条件を満たすスペクトル帯域は媒質の分散のため制限を受ける。このため、入射波の持つスペクトル全体にわたって波長変換を行うことができず、波長変換された波にスペクトルの狭帯域化が起こり、従って、時間幅が広がる結果となる。

本論文は、擬似位相整合素子を用いた短パルスの波長変換における群速度不整合補償に関する著者の研究をまとめたものである。具体的には、100 fs前後のパルス幅をもつ近赤外光の第2高調波発生において、非平行擬似位相整合配置を用いて群速度不整合を補償できることを実験的に示した。さらに、第2・第3高調波のカスケード波長変換過程において、2次元擬似位相整合素子を用いることにより群速度不整合をまとめて補償することが可能であることを理論と実験の両面から確かめた。

本論文は6章からなる。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、本論文の位置づけと構成が述べられる。

第2章「2次非線形光学効果とフェムト秒光パルスの伝搬」では、本論文を理解するのに必要となる基礎的な事項が簡潔に説明されている。はじめに、擬似位相整合法の概略が紹介される。続いて、フェムト秒パルスに対する第2高調波発生過程を記述する結合波方程式を導き、近似解を求めることにより、その基本的な性質が明らかにされる。最後に、本研究で本質的な役割を果たすパルス面傾斜について、その生成法と伝搬特性が論じられる。

第3章「擬似位相整合フェムト秒第2高調波発生における群速度不整合補償」では、擬似位相整合格子に対し基本波を斜めに入射する非平行配置の第2高調波発生において、群速度不整合をパルス面傾斜により補償する方法が有効に働くことを実験的に確かめている。非平行配置では、基本波と第2高調波の群速度ベクトルは大きさが異なるが、同時に方向も異なる。よって、2つ

のベクトルの先端を結ぶ線に平行になるようにパルス面を傾ければ、2つのパルスは重なりを保ったまま伝搬し、群速度の不一致は解消される。実験では、非線形光学材料にニオブ酸リチウムを用い、波長  $1.55 \mu\text{m}$ 、パルス幅  $80 \text{ fs}$  の入力光に対し  $50\%$  を超える第2高調波変換効率を達成した。このときの第2高調波のパルス幅は約  $100 \text{ fs}$  であった。本論文で導入された群速度不整合補償を用いることにより、同じ条件で従来法を用いたときに比べ素子長をおよそ  $10$  倍伸ばすことが可能になった。このことは、第2高調波発生の効率は長さの2乗に比例するから、従来法に比べ  $100$  倍の変換効率を得られることを意味する。

第4章「2次元擬似位相整合素子を用いたフェムト秒カスケード第3高調波発生における群速度不整合補償」では、前章の方法を、カスケード波長変換により第2・第3高調波の同時発生に拡張した結果が述べられる。ここで第3高調波は基本波と第2高調波の和周波発生により生成される。複屈折を用いた角度位相整合法では同時に2つの過程で位相整合を満たすことは一般に不可能である。ところが、非平行擬似位相整合法を用いればそれは可能になる。ただし、そのためには市松模様に分極反転した2次元擬似位相整合素子が必要になる。著者は、この場合でもパルス面傾斜を用いて3光波の群速度不整合を補償することが可能であることを発見し、実験的に確かめた。実際、著者はニオブ酸リチウムの2次元周期分極反転素子を作成し、前章と同様の基本波に対し、第2高調波発生で  $25\%$ 、第3高調波発生で  $8\%$  の同時変換効率を達成した。パルス幅は、 $120 \text{ fs}$  の入力に対し、第2・第3高調波は約  $100 \text{ fs}$  であった。2次元周期分極反転素子はしばしば非線形フォトニック結晶と呼ばれる。本実験は、非線形フォトニック結晶の実用的に意味がある最初の応用例であるといえる。

第5章「1次元擬似位相整合素子を用いたフェムト秒カスケード第3高調波発生における群速度不整合補償」は、2次元擬似位相整合素子の代わりに1次元の素子でも、第2・第3高調波同時発生を可能にする配置があることを発見し、その理論的な予測を述べたものである。ただし、パルス面傾斜法を適用しても、3光波同時に群速度不整合を補償することはできない。著者は、基本波と第3高調波の群速度不整合を補償した場合に、シミュレーションにより変換効率やパルス幅を求めた。

第6章「まとめ」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、パルス幅  $100 \text{ fs}$  程度の短パルスを擬似位相整合素子で波長変換する際に不可避となる群速度不整合の問題を、非平行配置とパルス面傾斜法の導入により解決したことにある。本方法の導入によりコンパクトで高効率の波長変換が可能になった。また、本方法を第2・第3高調波の同時発生に拡張し、従来法では不可能であった、単一の2次元擬似位相整合素子による群速度不整合を補償した波長変換を実現した。この研究は2次元非線形フォトニック結晶の新しい応用法を開拓したのものである。このように本論文の成果は短パルス波長変換法を飛躍的に発展させるもので、物理工学へ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。