

論文審査の結果の要旨

氏名 永久保裕紀

強い超短パルスレーザーを希ガスに集光することで発生する高次高調波は、真空紫外線(EUV)から軟 X 線領域に至る広いエネルギー範囲で高いコヒーレンスを持つことから、近年、テーブルトップの新光源技術として活発な研究が進められている。高次高調波は基本波となる超短パルスレーザー光と同期しているため、光励起に伴う電子・格子構造の変化をアト秒領域の高い時間分解能でとらえる手法としての応用展開も進んでいる。本論文は、その中でも特に固体の伝導電子のアト秒領域の超高速ダイナミクスの観測を念頭に、EUV 領域の高次高調波を用いた二重スリット干渉計方式による屈折率計測装置の開発、およびポンププローブ分光法との組み合わせによる時間分解位相敏感屈折率計測法の開発を目指したものである。本論文は、6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的と論文の構成が簡潔に述べられている。

第2章では高次高調波発生について述べられている。超短パルスレーザーを用いた希ガスからの高次高調波発生の原理とその特性について概説された後、本研究で用いられた高次高調波発生の実験装置の構成、実際に観測された高次高調波の特性、分光器の性能、波長校正の手法、検出用 CCD カメライメージの歪み補正による分解能向上の手法について述べられている。

第3章は、二重スリット干渉計を用いた屈折率計測について述べられている。二重スリット干渉計による屈折率計測の先行研究が紹介され、高次高調波を光源として用いる利点が述べられている。続いて、72.8 eVにあるアルミニウムの内殻 2p 軌道からフェルミ面を構成する 3sp³混成軌道への遷移(L端)近辺の屈折率計測を行った実験が報告されている。高次高調波発生用の基本波光源として光パラメトリック増幅器を用いることで、波長可変の高次高調波を実現し、アルミニウム L 端近傍の屈折率分散の計測に成功している。さらに、屈折率計測の精度を決定する干渉計の位相誤差についての評価がなされている。

第4章は、二重スリット干渉計による屈折率計測と、ポンププローブ時間分解測定手法の組み合わせによる時間分解屈折率計測手法の開発について述べられている。同軸波面分割型ポンププローブ分光の装置構成や、石英基板を用いたポンププローブ時間遅延手法等の実験技術の詳細が記述された後、ポンプ光照射によって誘起される屈折率変化を、二重スリット干渉縞の変化を通して抽出する解析法について述べられている。続いて、波長 800 nm の光パルスを実験的にアルミニウムに照射した際に電子温度の上昇によって生じる L 端の屈折率変化の理論予測がなされ、実験結果との比較がなされている。本章の実験においては、理論的に予想される屈折率変化の大きさは、測定の検出限界と同程

度かそれ以下であると評価され、有意な信号を観測したと結論するには至っていない。

第5章では、第4章の結果を受けて、ポンププローブ時間分解測定における誤差要因を精査し、測定手法の改良がなされている。特に、高次高調波発生に用いるレーザーのビームポインティングを安定化する機構を導入し、位相差分の決定精度を向上する取り組みについて記述されている。他、CCD カメライメージの歪みや傾き、高調波エネルギーのドリフトの効果が位相差分の誤差に与える影響を精査し、それらがいずれも誤差の主要因にはなっていないことを明らかにしている。さらに、光ポンプの有無による二重スリット干渉縞波形の差から位相差分を抽出する解析手法について改善がなされた。以上の改良に基づき、開発した装置の位相差分検出限界について評価と考察がなされた。統計誤差の要因はショットノイズで決定されていること、位相差分の検出限界が測定の積算回数に依存せず 70 mrad に制限されていることを明らかにし、その主要因が干渉縞のモデル関数の適合度にあることを突き止めた。

第6章では、全体のまとめと展望が述べられている。

本研究で開発された装置と手法は、EUV 領域での固体の屈折率をクラマース-クローニツヒ変換を用いずに直接計測することを可能にし、さらに固体の光励起過程、特に強い光励起下での伝導電子の非平衡ダイナミクスやレーザーアブレーションのダイナミクスをアト秒時間領域でとらえる手法の基礎を築くものである。屈折率変化に相当する位相差分の検出限界は改善の余地があるものの、現時点で適切と考えられる評価と解析が行われており、今後のより検出精度の高い装置開発につながると期待される。以上より、本研究の成果は光科学、物性科学にとって大いに意義があると言える。

尚、本論文の中核をなす研究内容は指導教員らとの共同研究として学術雑誌に公表、及び公表予定であるが、論文提出者が自ら主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与は十分であると判断する。

以上の理由により、博士（理学）の学位を授与できると認める。