

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井野 雄介

フェムト秒パルスレーザーを用いたテラヘルツ周波数帯の電磁パルスの発生・検出する技術の研究が進み、様々な分野での応用が盛んに研究されている。テラヘルツ電磁波は光と電波の中間領域であり測定技術としても、光技術と高周波エレクトロニクスとの融合技術として興味深い研究対象である。例えば、テラヘルツ電磁パルスを用いた分光においては、電気信号と同様に、電場の時間波形を直接測定することが可能である。従って物質の誘電応答を評価する分光測定においては、応答関数の振幅と位相を同時に決定することが可能である。本研究では、この位相と振幅が応答の因果律によって拘束されることに着目し、時間領域反射分光法において試料と参照試料の位置ずれに起因する系統誤差を自動的に取り除くアルゴリズムを開発し、テラヘルツパルスを用いた新しい反射分光法を開発した。またテラヘルツパルスの持つ位相情報と偏光の自由度を組み合わせ、異方性媒質の誘電率テンソルを決定する手法を開発した。

本論文は以下の7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、テラヘルツ周波数帯が基礎研究・産業応用の両面から注目すべき領域である事を述べ、フェムト秒パルス技術の進展に伴うテラヘルツ帯研究の歴史と現状について述べている。その上で電磁パルスを使った分光において、位相情報の活用によって新たな分光手法が得られる可能性があることを示し、それを本研究の目的とすることを述べている。また、本論文の構成を示している。

第2章では本研究の理論的背景を述べている。まず可視光やテラヘルツ波を試料に入射した際に得られる透過・反射係数について、線形システム論におけるインパルス応答関数と関連して説明している。次いで、可視光の透過・反射測定について述べた上で、時間波形を用いた測定の特徴を説明している。更にその例としてテラヘルツ分光を挙げ、テラヘルツ分光が応用された研究の例を説明し、併せて産業応用が見込まれる分野について説明している。

第3章では、テラヘルツ電磁波パルスを用いた実験の方法について説明している。まずテラヘルツパルスを発生させる方法である光整流や検出する方法である電気光学効果について述べ、入射レーザー光の偏光や結晶方位に対する依存性を説明している。さらにテラヘルツパルスを効率よく測定するようにゲート・レーザー光の偏光を設定する方法について述べている。また検出の際にゲート・レーザー光の帯域が有限であることやレーザーの揺らぎが及ぼす影響についても述べている。加えて、テラヘルツパルスを用いた実験を行う為の実験系構築法について説明している。

第4章では、時間領域反射分光において、試料と参照用試料の位置が一致していない事に起因して生じる位相誤差について、測定される複素反射係数が満たすべき法則を用いてこ

れを除去する方法について説明している。まず応答関数が因果律に従うべきであることから導かれるKramers-Kronig関係式について述べ、これを変形したSingly - Subtractive Kramers-Kronig関係式(SSKK)を用いて測定された振幅と位相を解析する事により、簡便に位相誤差が除かれる事を示している。また典型的な誘電応答を記述するモデルである Lorentz振動子モデルとDrudeモデルを用いて理論的なスペクトルを計算し、これらの解析において位相誤差が除かれる精度を評価している。更に、これとは別に、エントロピー最大の原理を応答関数に課す(Maximum Entropy Method, MEM)事によって、応答関数が従うべき解析的な関係式を導出し、この式を用いて測定された位相を振幅のスペクトルと関連する成分と無相関な成分に分ける事により、位相誤差を取り除く方法について説明している。SSKKの場合と同様の理論的なスペクトルを用いた解析により、アルゴリズム精度の評価を行っている。

第5章では、第4章で得られたアルゴリズムを用いてテラヘルツパルスを用いた測定の解析を行っている。まず n -InAsのテラヘルツ領域複素反射スペクトルを解析し、位相を補正する事により妥当な誘電関数が得られる事を示している。補正の精度は試料位置のずれに換算すると $1\mu\text{m}$ に、また時間に換算すると6fsに相当し、テラヘルツパルスのパルス幅よりも遥かに小さい。またこの方法を不均一試料のイメージング測定に応用し、導かれている解析アルゴリズムにより正しい表面形状が抽出される事を示している。

第6章では、テラヘルツパルスの偏光自由度を位相情報と組み合わせる事によって、異方性媒質の誘電率テンソルを実部・虚部同時に決定する方法について説明している。またこの方法で磁場を印加した n -InAsのHall効果を測定し、理論的な予測に適合する誘電テンソルスペクトルを得ている。さらに誤差の評価を行い、測定精度を向上する方法について考察を行っている。

第7章では、本研究の結果をまとめると同時に、課題と今後の展望を述べている。また予想される本研究の波及効果について述べている。

この他、本論文を理解する上で参考となる知識について、付録A-Fを設けて説明している。

以上のように本研究は、テラヘルツ電磁波パルスを用いた時間領域反射測定における位相の誤差について、複素反射率が普遍的に満たすべき法則を用いて除去されることを見だし、それを用いて物質の応答関数の情報を効率よく抽出できる事を見出した。これらをもとに、分光計測法を考案しその原理実証を行うことに成功している。この成果は、様々な未知物質を測定する方法として有望であるテラヘルツ電磁波パルスを用いた分光の応用範囲を広げるだけでなく、近年急速に発達しつつある極超短光パルス位相測定技術へも応用され得るものである。これらは今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。