



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トポロジカル光波を用いたコヒーレント分光法の確立 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	重松, 恭平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12821号
Issue Date	2017-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66504
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Kyohei_Shigematsu_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 重松 恭平

学 位 論 文 題 名

トポロジカル光波を用いたコヒーレント分光法の確立
(Coherent spectroscopy using topological lightwaves)

トポロジカル欠陥は対称性破れを伴う相転移の結果として形成され、あらゆる物理系に普遍的に存在する。例えば、レーザー発振における対称性破れは横モードにトポロジカル欠陥を形成する。このとき位相のトポロジカル欠陥(位相特異点)を有する光波を光渦、偏光のトポロジカル欠陥(偏光特異点)を有する光波を偏光渦と呼ぶ。これらトポロジカル光波は大域的な位相および偏光特性を持ち、一般的なレーザーの横モードであるガウシアン光波には無い様々な性質を発現する。例えば、光渦はそのトポロジカル位相を反映した軌道角運動量を運び、偏光渦はその回転対称な偏光分布により、強く集光した際の焦点付近に伝播方向に平行な縦電場を生じる。これらの性質を活用した応用範囲は幅広く、微粒子操作や光通信、金属レーザー加工などが実現されている。また、トポロジカル光波による電子励起は新たな物理現象の発現や新規の物性計測として期待され、特に原子系と分子系において研究が進んでいる。一方、固体、特に基礎・応用の両面から重要な位置を占める半導体において、トポロジカル光波を用いた物性探索の実験報告は限定的である。この原因のひとつとして、多様かつ強い相互作用の介在する固体物性において、トポロジカル光波の性質を上手く利用し、その性質を反映した応答を選択的に取り出す分光手法が未開拓である点が挙げられる。本研究では、トポロジカル光波の特徴である位相および偏光がコヒーレント因子であることに着目し、コヒーレント分光に立脚したトポロジカル光波による物性探索および計測法を確立する。

本論文は全五章で構成される。以下に、各章の概要をまとめる。

第一章「序論」では、トポロジカル光波の諸性質と、物性探索および計測におけるトポロジカル光波の有用性を踏まえ、本研究の目的を明らかにする。

第二章「コヒーレント分光へのトポロジカル光波適用の検討」では、トポロジカル光波の適用により可能となるコヒーレント分光の新たな機能について考究し、これに必要なトポロジカル光波の生成法および評価法の検討を行う。本章では、まずコヒーレント分光法として用いる四光波混合(FWM)分光と、試料として用いた窒化ガリウム(GaN)について基礎的事項をまとめる。その後、FWM分光にトポロジカル位相分布を有する光渦パルスを適用することで、光励起電子(励起子)系の軌道角運動を反映した大域的空間コヒーレンス評価が可能であることを示す。また空間コヒーレンスの定量的評価を実現するため、独自の軌道角運動量分解分光法を開発する。この手法の原理と性能について、実験結果にもとづいた考察を加える。また、本章ではFWM分光における偏光渦パルスの適用についても検討を行う。FWM分光に偏光渦パルスを適用すると、偏光渦断面に分布した全方位直線偏光に対する応答から、異偏光励起子応答を一度に測定できる。測定時間を大幅に短縮可能な本手法により、励起子多体相互作用や試料に残留した歪の高確度測定が実現される。この高確度測定に際して必要な偏光渦パルスの生成法と、FWM信号光の偏光測定において必須となるストークス偏光解析法についても述べる。

第三章「光渦パルスを用いたコヒーレント分光」では、光渦パルスを用いたFWM分光を確立

し、実験結果から励起子重心運動の軌道角運動を反映した大域的空間コヒーレンスについて、その特徴を明らかにする。本章では、FWM 信号光に対する軌道角運動量分解分光の結果から、フリースタンディング GaN 励起子の重心運動が光渦パルスの軌道角運動量を反映すること、励起子軌道角運動が位相緩和時間内 (ピコ秒) で十分保持されサブナノ秒に到達し得ることを示す。また欠陥を多く含むサファイア基板上 GaN 試料の結果と比較することにより、軌道角運動量緩和が励起子散乱の空間分布に依存することを示す。さらに複数のトポロジカル位相を有する光渦 (複合光渦) を生成し、これを励起に用いた FWM 分光および軌道角運動量分解分光を実現する。複合光渦は同一条件下でのトポロジカル位相依存性解析を可能にする。測定結果から、トポロジカル位相の増加に伴う励起子軌道角運動量緩和の増大が示され、励起子散乱の空間依存性にもとづくモデル計算と傾向が一致することを明らかにする。一連の実験結果から、励起子重心運動の軌道角運動が励起子散乱の空間分布に依存することを結論する。

第四章「偏光渦パルスを用いたコヒーレント分光」では、偏光渦を用いた励起子異方性のスナップショット計測法を確立する。異方的な歪を持つ GaN 試料は励起子遷移確率に偏光異方性を持ち、この試料に偏光渦を照射すると、信号光が特徴的な強度分布を示す。したがって、強度分布のみから異方性を瞬時に定量評価可能である。実験によって得られた異方的遷移確率から見積もられる交換相互作用定数が過去の報告と一致することを示し、測定の信頼性や確度について考察を加える。次に膜厚や歪の異なる試料に本手法を適用し、手法が微小な異方性に十分な感度および歪解析精度を持つことを示す。加えて本章では FWM 信号光の偏光特異点解析を新たに提案し、対称性破れに対する高感度な計測となり得ることを実証する。偏光渦が持つ偏光の回転対称性が失われると、偏光特異点には分裂が生じる。この性質を利用し、信号光における偏光特異点の分裂方向や分裂幅から、励起子系との相互作用がもたらす回転対称性破れを明らかにする。

第五章「総括」では、本論文の総括を行うとともに、今後の展望について述べる。