

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小嶋 映二

強磁性は我々の日常でもっともなじみ深い物理現象のひとつであるが、その発現機構は電子の遍歴性と局在性が複雑に絡み合うことから、固体物理学の難問として永く議論が続いている。近年半導体材料に磁性元素を均一に導入した希薄磁性半導体材料の開発が進み、基礎応用共に急速な進展が見られる。特に、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 等のIII-V族磁性半導体は既存の半導体技術との整合性も良いことから注目を集めている。しかし、強磁性発現の臨界温度はまだ100ケルビン台にとどまっており、またその強磁性発現機構も未解明である。本研究は最近急速に進歩した超高速レーザー分光法を駆使して、この問題に取り組んだものである。

物質の光学応答は、結合状態密度を反映し物質のミクロな電子状態に対する豊富な情報を与える。しかし、一方で磁性に対する応答は間接的であり、比較的弱い。本研究では、磁気光学効果と時間分解過渡分光法を組み合わせ、磁性に関する情報を分光学的に抽出する方法を開拓し、磁性と電子状態の関係を明らかにすることを目的とした。この手法を $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ に応用し、この物質系における磁化のダイナミクスを捉え、それをもとに、電子状態と磁性との関わりについて新しい知見を得たものである。

本論文は以下の8章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、III-V族磁性半導体の強磁性発現機構に関する研究と時間分解磁気光学など、本研究の背景について紹介し、これらを踏まえた上で本研究の目的を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、まず強磁性発現機構に関するこれまでの理論的な研究の概略を述べている。次に、III-V族磁性半導体におけるこれまでの実験的研究の概要について述べ、強磁性発現機構の議論の論点を整理している。次に磁気光学効果の機構について、電子系、スピンおよび電磁場との相互作用をもとに解説している。さらに、時間分解分光の強磁性体への適用例として、これまでに行われたパルス光照射による時間分解磁気光学分光の実験例を紹介している。

第3章では、本研究で行った実験についてその基礎事項について述べている。まず、光源および波長変換の方法、ポンププローブ分光法、およびその際のデータ取得法など本研究に共通する事項について述べ、続いて4章から6章に述べる各々の実験に即した実験手法について詳述している。さらに、本研究で用いた試料についてその基礎的事項に関して説明している。

第4章では、2色のプローブ波長を用いた時間分解磁気光学分光法について述べている。二つの異なるプローブ波長で測定した磁気光学効果の過渡応答のデータと反射率の時

間変化のデータを組み合わせることで、磁化の応答関数を抽出できることを示している。この手法により $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ における光パルス照射後の脱磁化過程のダイナミクスを明瞭に観測し、スピン系の温度は正孔の温度上昇と比較してゆっくり立ち上がることを見出している。この結果は、フェルミ面近傍で正孔が強いスピン偏極をしていることによると結論している。

第5章では、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ で観測されている中赤外吸収帯に着目し、光照射後の過渡吸収スペクトル測定を行った結果について述べている。得られた中赤外吸収スペクトルの過渡応答と4章で測定した磁化の応答特性を比較し、中赤外吸収帯に磁化と呼応して変化する成分があることを見出している。この成分のスペクトルを抽出し、吸収端が光励起による脱磁化に伴い、高エネルギー側に移動することを見出している。この結果から、中赤外吸収帯の起源はMn由来のアクセプタバンドから価電子帯へのホールの遷移によるものであること、変化成分は自発磁化の減少に伴うアクセプタ束縛磁気ポーラロンの束縛エネルギーの変化によると結論している。

第6章では、4章と5章の結果をふまえ、光励起による磁化の減少によって電子状態がどのように変化したかを調べるために、可視領域の磁気カーブスペクトルの過渡応答スペクトルを測定した結果について述べている。4章で述べられた磁化変化成分の抽出法を多波長に拡張し、過渡磁気カーブスペクトルから磁化の時間変化に追従する光学スペクトル成分を抽出した。これにより、光励起を通じて与えられた磁化の変化によって、光学遷移で検出する結合状態密度の変化を捉えることができた。その結果、バンド端遷移の低エネルギー側で磁化に依存して磁気カーブスペクトルが大きな変化を示すことを見出している。これは通常のバンドギャップ内にアクセプタバンドが存在し、そこから伝導帯への遷移がバンド端の低エネルギー域の吸収となり、磁化に敏感であることを示している。これは5章の結論を支持するものである。

7章では、これまでに提唱されているIII-V族磁性半導体の強磁性発現機構 (Runderman-Kittel-Kasuya-Yoshidaモデル、二重交換モデル) と本研究での実験結果の比較、検討を行っている。

8章では、本研究の結果をまとめ、最後に課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は、超高速時間分解分光法を磁気光学分光や中赤外過渡吸収分光に適用し、磁性体の電子状態と磁性の相関を調べる手法として開拓した。さらに、この手法を新しい強磁性体として注目されている、III-V族磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ に適用し、磁化のダイナミクスを抽出し、さらに遷移金属に由来するアクセプタバンドが強磁性と強く関わっていることを見出した。これらは、磁性研究において新たな分光手法を開拓すると共に、強磁性半導体材料の設計指針を与える新たな知見を与えた点で重要な意義があり、

物理工学の発展への寄与は大きい。

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。