

博士論文（要約）

**Ultrafast manipulation of
the electronic structure and magnetization
in ferromagnetic epitaxial thin films
based on semiconductors**

（半導体をベースとした強磁性エピタキシャル薄膜
における電子構造と磁化の超高速制御）

石井 友章

強磁性体における電子構造や磁化のフェムト秒からピコ秒レベルでの高速制御は、高速動作スピントロニクスデバイスを実現する上で不可欠な極めて重要な課題である。本論文では、既存の半導体デバイスと整合性の良い半導体をベースとした強磁性エピタキシャル薄膜を用いて、超短パルス光による電子構造や磁化の超高速制御について研究を行い、強磁性半導体のバンド構造の解明、テラヘルツ高速磁化応答の起源の解明、およびテラヘルツ光による極めて大きな磁化変調に成功した。

強磁性半導体は母材の半導体に数%の磁性元素を添加することによって得られる半導体をベースとした強磁性体である。その中でも、GaMnAsは半導体GaAsに磁性元素Mnを添加して得られる最も典型的な強磁性半導体の一つであるが、その強磁性の発現機構に関しては様々な議論があり、統一的な理解はなされていない。GaMnAsの強磁性の起源を理解する上で、フェルミ準位近傍の電子構造を明らかにする必要があるが、本論文では超短パルス光による電子構造の超高速制御技術を用いて、超高速過渡反射率スペクトルの測定を行った。この測定はGaMnAs中の吸収端の位置を選択的に検出することができる強力な手法である。実験から、GaMnAsのフェルミ準位がバンドギャップ中に位置することが明らかになった。クラマースクローニツヒの関係式を用いた詳細な解析により、フェルミ準位付近に、ドーピングしたMnによって誘起された電子状態（不純物帯）が存在することが明らかになった。これは、GaMnAsの強磁性状態がスピン偏極した不純物帯中の正孔によって安定化されていることを意味している。

一方で、本論文の上記の研究から、フェルミ準位付近のスピン偏極したキャリアを高速に制御することによって、電子状態だけではなく磁化も高速に制御できることが期待される。約一周期分の非常に短いテラヘルツパルス光を発生する技術を用いることにより、1ピコ秒以下のごく短い間に強い電磁場を強磁性薄膜に印加することができる。この技術は、磁化を減衰させずに高速かつコヒーレントに制御ができるため、応用上有望視されている。これまでの先行研究では、金属強磁性体において、テラヘルツパルス光誘起の小さな磁化変調が観測されている。磁化変調の起源については論争があり、起源は明らかになっていないが、一般的にはテラヘルツ光の磁場成分が起源であると考えられている。本論文では、GaMnAsとGaAsにおけるテラヘルツ応答を調べた。その結果、先行研究と同様のテラヘルツ応答が非磁性半導体であるGaAsにおいても観測された。これはテラヘルツパルス光の電界成分が磁化に対して支配的な影響を及ぼしていることを意味している。本研究の結果から、磁化のテラヘルツ応答において、一見磁化と関係がないように見える電界が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。GaMnAsにおけるテラヘルツ応答は、フェルミ準位付近のスピン偏極したキャリア密度を空間的に変調することによって生じていると考えられる。テラヘルツパルス光を用いた大きな磁化変調を実現するために、電界を効率良く試料に印加することが重要であることが明らかとなった。

一方で、サイズの小さい強磁性微粒子が母体の非磁性材料に埋め込まれたグラニューラ

一材料系を用いることにより、電界吸収によって生じる電界損失を非常に小さく抑えられると期待される。これにより、効率良く強磁性微粒子に電界を印加することができるため、大きな磁化変調が期待できる。本論文では、母材のGaAs中に約十ナノメートルサイズのMnAs強磁性ナノ微粒子が埋め込まれた試料に対してテラヘルツパルス光を照射し、磁化の高速変調を試みた。その結果、MnAs微粒子の磁化を20%程度変調することに成功した。この値は、これまで磁化のテラヘルツパルス制御の研究で報告されている中で最も大きな磁化変調量である。この結果は、超高速での磁化反転を目指す上で、電界を効率的に印加できるような材料を設計することが極めて重要であることを意味している。

以上のように、本論文では時間分解測定手法を用いて、電子構造を超高速に制御することによりGaMnAsの磁性の起源を明らかにし、テラヘルツパルス光を用いることによりGaMnAs強磁性薄膜やMnAs強磁性微粒子の磁化を超高速に制御し、それらの起源がテラヘルツパルス光の電界成分であることを示した。本論文の結果から、今後、超高速動作スピントロニクスデバイスの実現においては、電界を効果的に強磁性体に作用させるための材料設計が極めて重要であると考えられる。